タイヤ／路面接地応力分布による舗装路面の 転がり抵抗評価に向けた一検討

川上篤史¹・石垣勉²・白井悠³・寺田剛⁴・藪雅行⁵

¹ 正会員 博士 (工) 国立研究開発法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

E-mail : kawakami@pwri.go.jp

² 正会員 博士 (工) 株式会社 NIPPO 技術研究所 (〒331-0052 埼玉県 さいたま市 西区 三橋 6-70)

³ 正会員 株式会社 NIPPO 技術研究所 (〒331-0052 埼玉県 さいたま市 西区 三橋 6-70)

⁴ 正会員 国立研究開発法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

⁵ 正会員 国立研究開発法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

タイヤ／路面転がり抵抗を低減する舗装技術は、自動車から排出される CO₂ の削減が可能となるため、今後の低炭素社会に向けた新たな舗装技術であると考えられる。筆者らは、これまでに転がり抵抗を低減する舗装技術の開発やそのメカニズム解明に向けた研究を行っている。しかし、転がり抵抗と舗装の路面性状の関係は複雑であり、その評価手法も明らかになっていない点が多いのが現状である。本研究では、感圧紙によるタイヤと路面間の接地応力分布に着目し、その特性を把握するとともに、舗装路面の転がり抵抗の間接評価手法として適用性を検討した。その結果、接地応力分布は路面のテクスチャによって明らかな差異があること、ネガティブテクスチャ評価ができる可能性があること等が分かった。

Key Words : pavement surface, contact pressure distribution, power spectral density, rolling resistance, negative texture

1. はじめに

我が国の温室効果ガスの排出削減目標は、2030 年に 2013 年比で 26.0% 減の水準にすることが 2015 年 7 月 17 日の地球温暖化対策推進本部において決定され、「日本の約束草案」として国連気候変動枠組条約事務局に提出された。しかし、2013 年度の我が国の温室効果ガス総排出量は、二酸化炭素換算で約 14 億 800 万トンであり基準年である 1990 年度に比べて 11.7% 増加していることから、抜本的削減を実現する新技術が求められている¹⁾。

タイヤ／路面転がり抵抗 (以下、転がり抵抗) を低減する舗装技術は、自動車から排出される CO₂ を削減し、走行燃費を改善する、低炭素社会に向けた新たな技術であると考えられる。筆者らは、これまでに転がり抵抗を低減する舗装技術 (低燃費舗装) の開発やそのメカニズム解明に向けた研究を行っている^{2),3),4)}。しかし、転がり抵抗と舗装の路面性状の関係は複雑であり、欧米において検討事例^{5),6),7)}は増えてきているものの、まだ明らかになっていない点が多いのが現状である。

本研究は、転がり抵抗の評価手法として感圧紙による

タイヤと路面間の接地応力分布 (以下、タイヤ／路面接地応力分布) に関する検討を行い、その結果有用な知見が得られたので報告する。なお、本検討は (国研) 土木研究所と (株) NIPPO の共同研究「低炭素舗装技術の高度化に関する研究」により実施したものである。

2. 研究方法

自動車単体の CO₂ 排出量や走行燃費は、走行抵抗によって大きく影響を受ける。走行抵抗は、空気抵抗、転がり抵抗、勾配抵抗および加速抵抗から構成される⁸⁾ が、舗装路面が直接的に影響を与えるのは転がり抵抗である。したがって、舗装路面の転がり抵抗を低減することによって自動車からの CO₂ 排出量や走行燃費が改善することが可能となる。この転がり抵抗を低減する舗装技術の性能評価法を整理した結果⁹⁾を表-1 に示す。本舗装技術の性能として、①タイヤ／路面転がり抵抗低減性、②自動車走行燃費向上性、③自動車 CO₂ 排出低減性が挙げられる。これら性能を評価するには、直接評価方法と間接評価方法に分類することができる。タイヤ／路面転がり抵

表-1 転がり抵抗を低減する舗装技術（低燃費舗装）の性能指標と性能評価法⁹⁾

舗装の性能	性能指標	測定方法	
		直接測定法	間接測定法
①タイヤ／路面転がり抵抗低減性	転がり抵抗係数	すべり抵抗測定車による転がり抵抗測定方法	転がり抵抗係数算出による測定方法
②自動車走行燃費向上性	自動車走行燃費	燃焼消費計による測定方法	燃費算定式による測定方法
③自動車CO ₂ 排出低減性	自動車CO ₂ 排出量	CO ₂ 排出量測定車による測定方法	CO ₂ 原単位を用いた算定方法

図-1 ネガティブテクスチャ・ポジティブテクスチャの概念図

写真-1 タイヤ／路面接地応力分布の測定

抗低減性を評価するには、転がり抵抗の直接計測が有効であると考えられる。しかし、そのためには特殊な測定車両が必要となることから、今後、転がり抵抗を低減する舗装技術を広く適用していくためには、間接評価法によって簡易に測定できることが望ましい。

転がり抵抗の間接評価には、平たん性、テクスチャ指標および走行速度等を用いることを考えている⁹⁾。このうち、テクスチャ指標は平均プロファイル深さ（MPD）、平均テクスチャ深さ（MTD）、センサ決め深さ（SMTD）が挙げられる¹⁰⁾。さらに、転がり抵抗に影響を及ぼすテクスチャの凹凸形状としてネガティブテクスチャ・ポジティブテクスチャが挙げられている^{5),10)}が、その定量的な分類についてもまだ明確な手法が定まっていないのが現状である。なお、本論文におけるネガティブテクスチャ及びポジティブテクスチャの概念は図-1に示すとおりであり、特長として前者は骨材が緻密に並びかつ骨材間にくぼみ（微細な隙間）がある状態、後者は路面から骨材が突出している状態とした。

本研究では、このネガティブテクスチャ・ポジティブ

表-2 接地応力分布試験条件

項 目	内 容
試験輪種類	165SR13（ゴム配合ASTME500準拠）
試験輪荷重	3,969N±98N
空気圧	0.176MPa
載荷時間	2分（所定荷重に達するまで5秒程度）
感圧紙の種類 （応力範囲）	感圧紙1 0.05～0.2MPa
	感圧紙2 0.2～0.6MPa
	感圧紙3 0.5～2.5MPa
測定箇所数	2箇所（各1回）／工区

図-2 試験工区の概要

テクスチャの分類方法を検討する新たなテクスチャ評価法としてタイヤ／路面接地応力分布に着目し、その特性を把握した。また、既往のテクスチャ指標値およびパワースペクトル密度¹⁰⁾（以下、PSD）との関係を整理し、転がり抵抗評価法としての可能性を検討した。

(1) タイヤ／路面接地応力分布の測定

タイヤと路面間の接地特性として、ネガティブテクスチャ路面では接地面積が大きくかつ接地応力が均一となり、ポジティブテクスチャ路面では接地面積が小さくかつ接地応力が高くなると考え、接地応力分布を測定した¹¹⁾。測定は、すべり抵抗測定車およびすべり抵抗測定用タイヤを用い、感圧紙に一定荷重・一定時間載荷（接地）させた（写真-1）。測定条件を表-2に示す。

測定箇所は、1工区につきその路面を代表すると考えられる2箇所を抽出し、1回ずつ計測した。なお、後述する路面にクラックがある一部の工区についてはクラックのある箇所とない箇所での測定し平均値を求めた。また、感圧紙は測定圧力範囲が決まっており、3種類の感圧紙を用いた。この感圧紙は、圧力により発色剤層のマイクロカプセルが破壊され、顕色剤に吸着して反応し赤く着色する。接地試験後、感圧紙を専用スキャナで読み込み、赤色の濃淡によって圧力解析を行った。そして、接地応力ごとの接地面積を算出し、各種路面の特性を把握した。

(2) 試験に用いた舗装の路面性状および PSD の測定

試験に用いた舗装路面は、国土技術政策総合研究所試験走路(図-2)の22路面を対象とした。路面性状として、各テクスチャ指標値を表-3に示す。舗装の種類は、密粒度、排水性、SMA、連続鉄筋コンクリート、低燃費の各

表-3 試験工区の概要

No.	混合物名	工区延長 (m)	MPD (mm)	SMTD (mm)	MTD (mm)	BPN (20℃補正)
1	排水性(13)	60	1.54	1.37	2.01	67
2	密粒度(20)	60	0.35	0.32	0.30	69
3	低燃費①	60	0.61	0.46	0.67	69
4	低燃費②	60	0.58	0.41	0.56	64
5	低燃費③	60	0.71	0.50	0.96	62
6	低燃費④	60	0.62	0.42	0.64	63
7	密粒度Cr	95	0.79	0.47	0.92	64
8	コンクリートCr	80	0.44	0.29	0.47	66
9	SMA(5)	120	0.72	0.51	0.71	66
10	SMA(13)	120	1.21	1.08	1.26	69
11	排水性(5)Cr	120	1.01	0.69	1.16	55
12	排水性(5)	80	1.07	0.68	1.37	55
13	排水性(13)	80	1.79	1.26	1.80	47
14	密粒度	80	0.71	0.34	0.65	61
15	コンクリートCr	80	0.40	0.21	0.44	66
16	排水性(20)	55	3.50	2.67	4.80	62
17	排水性(20)	45	2.45	1.80	2.81	64
18	排水性(10)	55	1.49	0.93	1.36	54
19	排水性(13)	55	1.93	1.21	1.89	51
20	排水性(13)	60	2.11	1.49	2.05	56
21	密粒度Cr	95	0.84	0.46	0.81	58
22	コンクリート	80	0.52	0.23	0.48	63

Cr) タイヤが通過する部分にクラックがある工区

種舗装で、骨材粒径や路面の劣化状態も様々である。なお、試験工区のうちタイヤが通過する部分に縦断クラックがある工区については、クラックがある箇所とない箇所において路面性状を測定し平均した。

また、新たに PSD もタイヤ／路面接地応力分布の測定と同じ箇所(1工区につき2箇所・1回ずつ)で計測し、その特性も把握した。PSDは短波長成分を対象にレーザー変位計により0.1mm間隔でサンプリングし、1分の1オクターブバンド分析を行うことによって算出した。

3. 研究結果

(1) 試験路面のタイヤ／路面接地応力分布の特性

得られたタイヤ／路面接地応力分布のコンター図(抜粋)を図-3に示す。図より、路面のテクスチャによって接地応力分布は明らかな差異があることが分かる。例として、4工区は全接地面積が大きく、接地応力が均一になっている一方で、8、12、21、20、16工区になるにつれ接地面積が小さくなり、接地応力が局所的に高い箇所が多くなっていく。これは、テクスチャが均一であるネ

図-3 タイヤ／路面接地応力分布コンター図(抜粋)

ガティブテクスチャ路面からテクスチャが粗いポジティブテクスチャ路面に移していることを視覚的におよそ分類できる。

この接地面積について、順に整理した結果を図-4に示す。図より、路面が密になっていると想定される密粒度、コンクリート、低燃費舗装などの接地面積が大きく、路面が粗面になっていると考えられる工区の接地面積が小さくなる傾向がある。しかし、接地面積が最大である2工区密粒度(20)の値は最小である19工区排水性(13)の値の1.17倍で、各工区間の接地面積の差はそれほど大きくない。次に、路面状態による接地応力の差を明らかにするため、接地応力毎の接地面積の推移を整理した結果を図-5に示す。比較として平滑板に載荷した際の接地面積も追加した。この平滑板と各路面の接地応力の面積推移を比較した結果、各舗装路面の接地面積は、0.50-0.75MPa付近を境に、応力が低い領域では平滑板より少なく、応力が高い領域では多くなる傾向があった。

図-4 各試験工区の接地面積

そこで、接地応力を0.05-0.5, 0.5-0.75, 0.75-1.75, 1.75MPa以上で分けて整理した。

当初からの想定として、ネガティブテクスチャ路面は接地応力の低い面積割合が多くかつ接地応力の高い面積割合が少なくなり、ポジティブテクスチャ路面では逆に考えると考えられる。ここで、各路面の低い接地応力(0.5MPa以下)の面積割合と高い接地応力(0.75MPa以上および1.75MPa以上)の面積割合の関係を整理したところ、図-6のとおり両者とも相関が認められた。これより、高い接地応力の面積割合のみ(もしくは低い方のみ)を計測することにより、低い接地応力分布の傾向も定量的に把握できる可能性があると考えられる。

ここで、タイヤ/路面接地応力分布の測定には、表-2で示したように圧力範囲の異なる3種類の感圧紙を用いるため、1箇所の測定には載荷試験を3回行った。今後、様々な路面のタイヤ/路面接地応力分布の測定や測定方法の汎用化を検討するには、測定を効率化することが望

図-6 接地応力0.5MPa以下と0.75MPa・1.75MPa以上の面積割合の関係

図-5 接地応力ごとの面積推移

ましい。図-6では高い接地応力として0.75MPa以上および1.75MPa以上を抽出し両者とも0.5MPa以下の面積割合と相関があったことから、①接地応力が局所的に高くなるほど転がり抵抗に影響を与える可能性が高いと考えられること、②計測する圧力範囲を絞ることによって試験の効率化が図れることから、接地応力0.75MPa以上の面積割合を選定することとした。よって、今後の载荷試験は、表-2の感圧紙3（圧力範囲0.5～2.5MPa）のみを用いて全接地面積と接地応力1.75MPa以上の面積を計測することで、その路面のタイヤ／路面接地応力分布の代表値として用いることが出来る可能性がある。

次に、この接地応力1.75MPa以上の面積割合を用い、順に並べた結果を図-7に示す。テクスチャの凹凸形状が大きな路面ほど、接地応力が局所的に高くなり面積割合が大きくなることを示していると考えられる。この図より、面積割合が高い路面はポジティブテクスチャ、面積割合が低い路面はネガティブテクスチャであると考えられ、これらを定量的に分類できる可能性があることが分

図-7 高い接地応力の面積割合順の整理

かった。なお、接地面積割合が高い工区で最大値と最小値の差が大きくなったケースもあった。これは路面が粗いほど測定値のばらつきが大きくなることが考えられ、測定回数の検討も必要と考えられる。

(2) 試験路面の PSD の特性

各路面の PSD の測定結果を図-8に示す。縦軸は、1分の1オクターブバンド分析を行った PSD ($\text{m}^2 \cdot \text{m}/\text{cycle}$)、横軸は波数 (cycle/m) である。波数が3～100 cycle/m の範囲では各工区に大きな差異があることが分かった。ここで、図中の波数10 cycle/m付近で PSD が最小の路面はコンクリート舗装で、PSD が最大の工区は排水性舗装(20)である。そこで、舗装の種類毎の傾向を把握するため、排水性、低燃費、密粒、コンクリートの舗装毎に整理した結果を図-9に示す。図より、舗装の種類毎に PSD の傾向が明らかに異なり、路面テクスチャが密な密粒、低燃費、コンクリート舗装は排水性舗装と比べて PSD が全体的に低くなっていることが分かる。また、排水性舗装では、最大骨材粒径が小さくなるほど PSD も低くなる傾向があり、特に波数10 cycle/m 付近の差が顕著であった。よって、各種テクスチャ指標との比較にはこの波数10 cycle/m 付近の実測値である波数13 cycle/m の PSD を用いた。また、小粒径5mm TOP を用いた際の路面テクスチャの評価には波数200以上（波長5mm未満）の PSD が相当すると考え、波長約2.4mm相当となる実測値の波数413 cycle/m の PSD も用いた。

(3) 既存の路面指標との関係および転がり抵抗の評価法に向けた検討

タイヤ／路面接地応力分布および全接地面積と、PSD も含めたテクスチャ評価指標の相関関係を整理した結果

図-8 各試験工区の PSD

図-9 既存のテクスチャ評価指標との関係

表-4 既存のテクスチャ評価指標との関係

評価項目	全接地面積	相関係数			
		接地応力			
		0.05-0.5	0.50-0.75	0.75-1.75	1.75以上
MPD*	-0.86	-0.85	-0.12	0.76	0.90
SMTD*	-0.83	-0.78	-0.03	0.69	0.81
MTD*	-0.85	-0.86	-0.05	0.79	0.88
BPN	0.42	0.52	0.14	-0.53	-0.51
PSD(13c/m)*	-0.80	-0.77	-0.10	0.67	0.85
PSD(416c/m)*	-0.63	-0.64	-0.14	0.62	0.54

*) データを対数変換し直線近似して求めた相関係数

を表-4に示す。まず、タイヤ／路面接地応力分布および全接地面積は、きめ深さ指標のMPD、SMTD、MTDおよびPSD(13cycle/m)と高い相関がある。一方、当初、小粒径5mmTOPを用いた路面の評価を想定したPSD(416cycle/m)は高くない結果となった。また、すべり抵抗の指標であるBPNとの相関係数は高くなかったが、すべり抵抗と転がり抵抗は影響するテクスチャ範囲が重なる部分もあることから、今後も確認していく必要があると考える。

次に、テクスチャ評価指標と全接地面積および各タイヤ／路面接地応力毎の相関係数を比較すると、接地応力1.75MPa以上の値がMPDおよびMTD、PSD(13cycle/m)との相関が一番高い結果となった。よって、今後のタイヤ／路面接地応力分布の測定は、接地応力1.75MPa以上の面積を計測することで、既存のテクスチャ評価指標と同様またはその代替として用いることが出来る可能性があると考えられる。

以上より、タイヤ／路面接地応力分布は他のテクスチャ評価指標と同様、定量的にテクスチャを評価することができ、図-3および図-7に示したとおり舗装路面の状態によって明らかな差異があることから、ネガティブテクスチャ・ポジティブテクスチャの分類および低転がり抵抗路面の間接評価手法の一つとなる可能性があることが分かった。今後は、各路面の転がり抵抗測定値との関連性を明らかにし、タイヤ／路面接地応力分布によるテクスチャ形状の分類のしきい値を検討する必要があると考えられる。

4. まとめ

本研究結果をまとめると、以下のとおりになる。

- (1) 路面のテクスチャによって接地応力分布は明らかな差異があり、ネガティブテクスチャ路面とポジティブテクスチャ路面を視覚的におおそ分類できる。
- (2) 各路面の低い接地応力(0.05-0.5MPa)の面積割合と高い接地応力(1.75MPa以上)の面積割合は、相関関係が認められた。今後、全接地面積と高い(もしくは低い)接地応力面積を計測することで、全体の接地応力分布の特性を把握することが出来る可能性がある。
- (3) テクスチャの凹凸形状が大きくなるほど接地応力が局所的に高くなり、この面積割合を計測することで

ネガティブテクスチャ・ポジティブテクスチャを定量的に分類できる可能性がある。

- (4) 各路面の PSD は舗装の種類によって明らかに傾向が異なり、波数が 3~100cycle/m の範囲では特に差異がある。
- (5) タイヤ/路面接地応力分布は、既存のテクスチャ評価方法である MPD, SMTD, MTD および PSD (13cycle/m) と高い相関関係があり、特に接地応力 1.75MPa 以上の値が一番相関が高かった。なお、すべり抵抗の指標である BPN と接地面積の相関関係は高くなかった。
- (6) タイヤ/路面接地応力分布は、ネガティブテクスチャ・ポジティブテクスチャの分類および低転がり抵抗路面の間接評価手法の一つとなる可能性がある。

参考文献

- 1) 地球温暖化対策推進本部:2013 年度の地球温暖化対策及び施策の進捗状況, 2016
- 2) 石垣勉, 白井悠, 川上篤史, 久保和幸:自動車走行燃費の向上に寄与するタイヤ/路面転がり抵抗の小さい低燃費アスファルト舗装技術の開発, 第 30 回日本道路会議, 2013.
- 3) 川上篤史, 石垣勉, 白井悠, 寺田剛, 久保和幸:低燃費舗装の要求性能に関する検討, 日本道路会議, 2013.
- 4) 白井悠, 石垣勉, 川上篤史, 久保和幸:タイヤ路面転がり抵抗の性能評価法に関する検討, 日本道路会議, 2015.
- 5) U. Sandberg, A. Bergiers, J. Ejsmont, L. Goubert, R. Karlsson, M. Zoller: Road surface influence on tyre/road rolling resistance, Report MIRIAM_SPI_04, 2011
- 6) H. Bebdtsen: Rolling resistance, fuel consumption - a literature review, Danish Road Institute Technical note 23, 2004
- 7) J. Willis, M. Robbins, M. Thompson: Effect of Pavement Properties on Vehicular Rolling Resistance: A Literature Review, NCAT Report 14-07, 2014
- 8) 酒井秀男:タイヤ工学入門から応用まで (改訂版), グランプリ出版, 2001.
- 9) 石垣 勉, 白井 悠, 川上 篤史, 久保 和幸:低燃費舗装の性能指標とその評価に関する検討, 第 31 回日本道路会議論文集, 3P27, 2015.
- 10) 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, 舗装工学ライブラリー10, 2013
- 11) 川上篤史, 久保和幸, 石垣勉, 白井悠:タイヤ/路面接地応力分布による路面テクスチャの評価に関する検討, 土木学会第 71 回年次学術講演会, 2016.

EXAMINATION OF EVALUATION METHOD FOR ROLLING RESISTANCE BY TIRE-PAVEMENT SURFACE CONTACT PRESSURE DISTRIBUTION

Atsushi KAWAKAMI, Tsutomu ISHIGAKI, Yu SHIRAI, Masaru TERADA
and Masayuki YABU

The pavement technologies that can decrease tire-pavement rolling resistance are thought as the new pavement technology for the future low carbon society because it can decrease CO₂ emissions from the vehicle. The authors have been studying for the development of low rolling resistance pavement and the clarification of the mechanism of rolling resistance. However, the relationship between rolling resistance and pavement surface properties are complicated and the evaluation methods for rolling resistance have many points to be clarified. This paper reports that the tire-pavement surface contact pressure and power spectral density were focused on and examined the application as the evaluation method for the rolling resistance of pavement surface. As the results, it was revealed that the contact pressure distribution between tire and pavement surface were totally different depending on the pavement surface texture, and it have possibility to evaluate the negative texture of pavement surface.