

# タイヤ／路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の開発と性能評価方法に関する研究

## Development and performance evaluation method of low tire/road rolling resistance asphalt pavements

都市人間環境学専攻 白井 悠  
Yu SHIRAI

### 1. はじめに

道路は最も身近な社会資本であり、豊かな生活の実現と活力ある地域社会の形成に欠くことのできない社会基盤である<sup>1)</sup>。日本の近代舗装は、明治中頃までは馬車交通を対象とした碎石道の築造が主体であったが、その後、モータリゼーションの進化に合わせて改良されてきた。そして、1980年頃になると、地球温暖化やヒートアイランド現象などの環境問題に対して、舗装にも多様化や高度化を求められ、排水性舗装や再生加熱アスファルト混合物など地域や地球環境への負担軽減を期待した技術開発が行われてきた。

一方、温室効果ガスの一つであるCO<sub>2</sub>排出量の削減は、世界規模で取り組むべき環境対策の一つである。わが国では2030年度に2013年度比で26%削減の目標を国連に提出しており、2020年には2050年までにCO<sub>2</sub>の排出量実質ゼロの目標が掲げられた。2017年の資料では、わが国のCO<sub>2</sub>の排出量は運輸部門が約19%を占めており、このうち約9割は自動車からの排出である。自動車の走行に伴うCO<sub>2</sub>排出量を削減する方法は、a)自動車の走行燃費の改善、b)運転方法の改善、c)交通流対策に大別することができる。このなかで、a)に関しては、次世代型自動車の開発とともに、舗装路面からもアプローチが可能であると考えた。

走行燃費の改善には走行抵抗の低減が対応策の一つである。ここで、走行抵抗とは転がり抵抗、空気抵抗、勾配抵抗、および加速抵抗により構成される抵抗である。このうち転がり抵抗とはタイヤが路面を転動するときに、路面から進行方向と反対向きに受ける力であり、舗装路面と直接関連する走行抵抗といえる。このため、これからの次世代型舗装技術としてタイヤと路面間に生じる転がり抵抗の低減を目的としたアスファルト舗装材料とその施工方法の開発および性能評価方法について研究した。なお、路面の種類や状態により変化する転がり抵抗を、タイヤの転がり抵抗と区別して、タイヤ／路面転がり抵抗と呼ぶ。

本研究の構成を図-1に示す。

### 2. タイヤ／路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の開発

#### (1) 配合および施工に関する検討

自動車分野ではタイヤの転がり抵抗は、①タイヤの変形抵抗、②タイヤと路面の接地摩擦、および③タイ

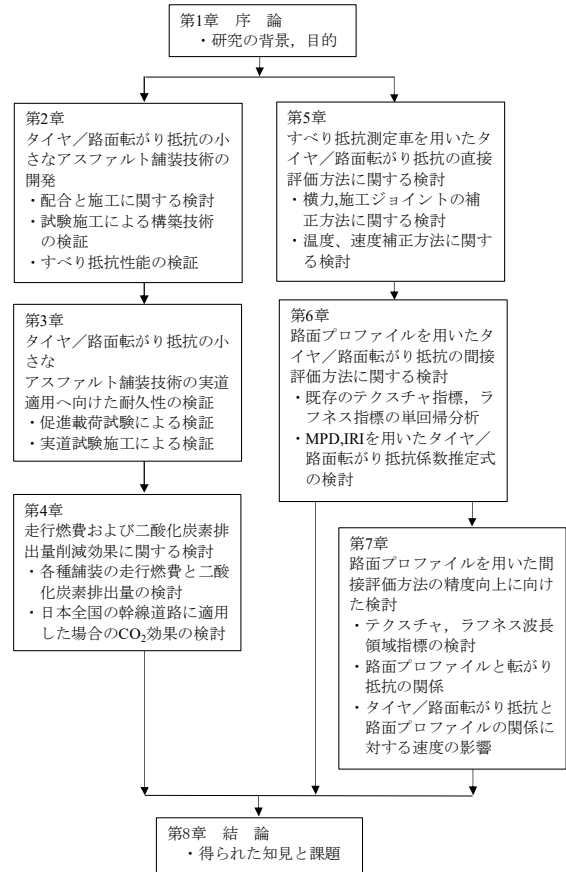


図-1 本研究の構成

ヤの回転に伴う空気抵抗に分類される<sup>2)</sup>。この中で変形抵抗は9割を占めており、その入力周波数は走行速度に依存するものの、10<sup>2</sup>~100Hz程度であるといわれている。この周波数域のタイヤの変形抵抗を大きくすることでタイヤの転がり抵抗を低減できる。しかし、すべり抵抗が低下する可能性があるため両立を図る必要がある。

一方、舗装分野において世界道路協会 (PIARC) が示している路面の縦断形状 (以下、路面のプロファイル) の波長領域区分と舗装性能<sup>3)</sup>を図-2に示す。図に示すように、路面プロファイルは波長領域により各種の舗装性能に及ぼす影響が異なり、タイヤ／路面転がり抵抗はマクロテクスチャからラフネス波長領域の振幅を小さくすることで低減できることがわかる。

また、図-2には路面プロファイル区分と材料／施工の関係についての検討結果を示している。図よりタイヤ／路面転がり抵抗に影響を与える路面プロファイルのうち短い波長領域 (以下、テクスチャ波長領域) はア

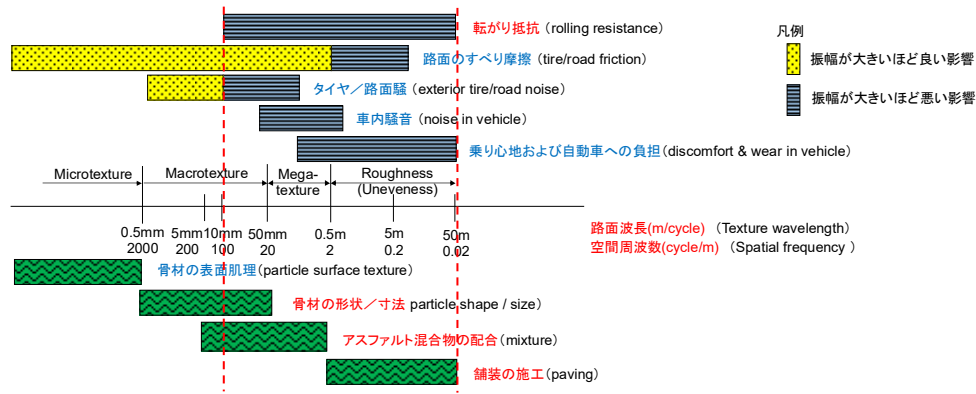


図-2 路面プロファイル区分と舗装性能、および材料/施工の関係<sup>3)</sup>

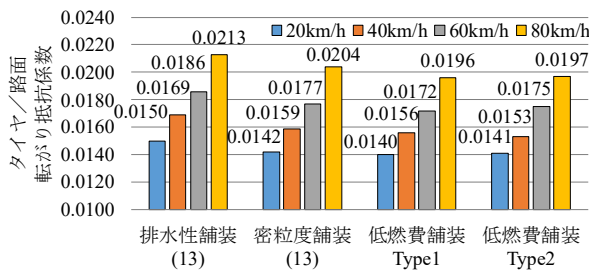


図-3 タイヤ/路面転がり抵抗係数(RRC)

スファルト混合物に用いる骨材や配合が影響を及ぼし、長い波長領域(以下、ラフネス波長領域)は施工に起因した路面プロファイルが影響を及ぼすと考えた。

(2) 試験施工による構築技術の検証

タイヤ/路面転がり抵抗を小さくするアスファルト舗装(以下、低燃費舗装)の構築技術を検証するために実機を用いた試験施工を実施した。試験施工は国土技術政策総合研究所の走行試験場に低燃費舗装の通常型(以下、低燃費舗装Type1)、低燃費舗装の排水性能重視型(以下、低燃費舗装Type2)、そして比較の一般的な舗装として最大粒径13mmの密粒度舗装(以下、密粒度舗装(13))、最大粒径13mmの排水性舗装(以下、排水性舗装(13))の計4種類を施工した。

性能の検証では、第5章で述べる測定方法で求めたタイヤ/路面転がり抵抗係数(以下、RRC)を比較した。測定結果を図-3に示す。図より、速度60km/hの場合、RRCは低燃費舗装Type1が排水性舗装(13)よりも7.5%低減していることを確認した。

(3) タイヤ/路面転がり抵抗とすべり抵抗性能に関する検討

本検討ではタイヤ/路面転がり抵抗とすべり抵抗性能の検討として、タイヤのスリップ率100%のときの摩擦係数ロック $\mu$  ( $\mu_{lock}$ )とすべり摩擦係数の最大値であるピーク $\mu$  ( $\mu_{peak}$ )との関係について検討した。結果を図-4に示す。図より、RRCと $\mu_{lock}$ 、 $\mu_{peak}$ は負の関係にあり、タイヤ/路面転がり抵抗を小さくするとすべり抵抗も小さくなるような関係はないことを実証した。

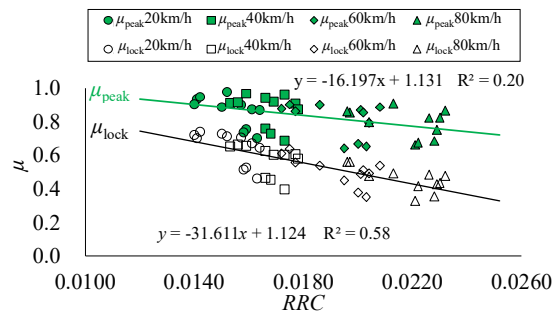


図-4 RRCと $\mu_{lock}$ 、 $\mu_{peak}$

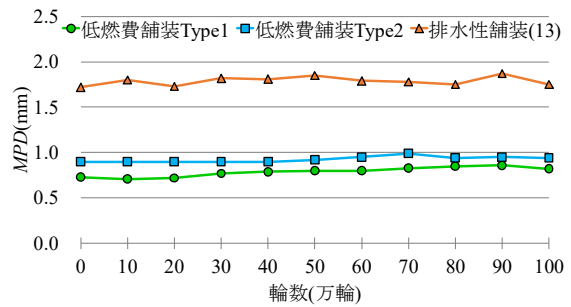


図-5 MPDの継時変化

3. タイヤ/路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の実道適用へ向けた耐久性の検証

(1) 促進荷試験による耐久性の検証

本検証は土木研究所の舗装走行実験場での荷重車を用いた促進荷試験により、交通量区分N<sub>5</sub>(250以上1,000未満台/日・方向)の10年分に相当する、大型車(49kN換算輪数)100万輪数相当を負荷した。結果の一部としてMPD(Mean profil depth)の継時変化を図-5に示す。

結果、100万輪相当負荷後においてひび割れ率は0%で、わだち掘れ量劣化程度は排水性舗装(13)と同程度であり構造的な耐久性を有することを確認した。また、平坦性、IRI(International Roughness Index)、MPD、BPN、動的摩擦係数、および浸透水量の劣化程度に関しても排水性舗装(13)と同程度であり、機能的な耐久性も有すことを確認した。これより、実道での供用に耐えうる耐久性を十分に有していることを実証した。

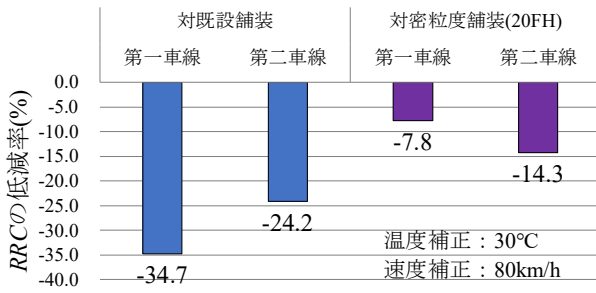


図-6 実道試験施工追跡調査結果

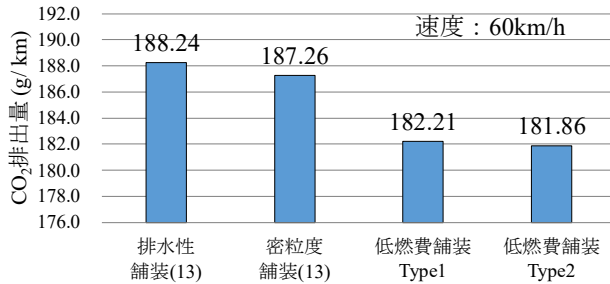


図-7 各路面のCO<sub>2</sub>排出量

(2) 実道試験施工による耐久性の検証

実道検証を2か所実施し、そのうちの一つである新潟国道では低燃費舗装と比較工区として該当地域の一般的な舗装である密粒度舗装(新20FH)を施工した。新潟県は積雪寒冷地であり冬期の除雪車等による骨材飛散が懸念されたため、配合基準値に低温(-20°C)カンタプロ損失率6%以下という基準を追加した。施工後は追跡調査を実施し、その結果の一部として施工2年経過後の比較路面に対するRRCの低減率を図-6に示す。図よりRRCは施工後2年経過しても性能を維持していた。また、その他の性状値の劣化度も従来舗装と同等以上であった。

4. 走行燃費および二酸化炭素排出量削減効果に関する検討

低燃費舗装の燃料消費量およびCO<sub>2</sub>排出量に関する検討では、燃料消費計を搭載した試験車両(普通乗用車)を用いた直接測定法にて行った。結果の一部として速度60km/hのときの各路面におけるCO<sub>2</sub>排出量の測定結果を図-7に示す。図より、低燃費舗装Type1と低燃費舗装Type2は他路面よりもCO<sub>2</sub>排出量が少ない結果となった。

また、日本の幹線道路に適用した場合の削減効果についても試算を行った。試算の結果、低燃費舗装Type1を適用した場合、排水性舗装(13)よりも年間約100万削減できることを示した。

5. すべり抵抗測定車を用いたタイヤ/路面転がり抵抗の直接評価方法に関する検討

(1) すべり抵抗測定車の概要

本検討ではすべり抵抗測定車を用いたタイヤ/路面転がり抵抗係数の測定方法を開発した。測定タイヤは路面すべり測定用標準タイヤ(タイヤ寸法：165-SR13, リブタイヤ)を用いた。

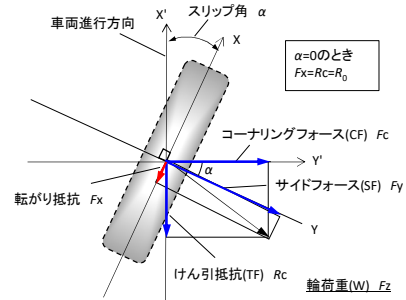


図-8 タイヤが受ける分力

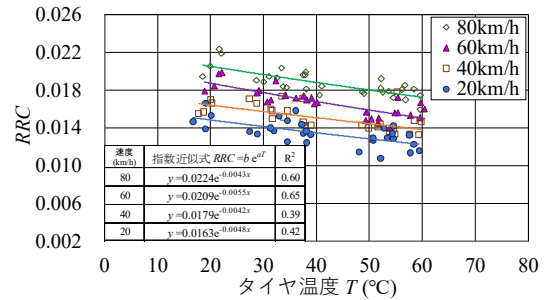


図-9 RRCと速度、タイヤ温度の関係(低燃費舗装 Type1)

(2) 微小な操舵の影響除去

タイヤ/路面転がり抵抗係数(RRC)の測定は直線道路を定速かつ直進走行による測定が基本である。しかし、直線道路でも横断勾配等の影響により微小な操舵が避けられない。ここに、微小な操舵時にタイヤが受ける分力を図-8に示す。図より、微小な操舵によりタイヤにスリップ角 $\alpha^\circ$ がつくと $F_c$ が発生し $R_c$ が増加する。ここで、 $F_x$ は操舵時のスリップ角が $\alpha^\circ$ のときの転がり抵抗であり式(5.1)に示すような関係がある。

$$F_x \approx R_0 \left\{ 1 + \left( \frac{F_y}{F_z} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5.1)$$

ここで、 $R_0$ は横力 $F_y$ がゼロのときのけん引力であり、 $R_c$ から $F_y$ の影響を除いた値である。したがって、タイヤ/路面転がり抵抗を適切に評価するには、 $R_0$ を算出することが必要である。そこで、式(1)の変数をすべり抵抗測定車で実測可能な $R_c$ 、 $F_c$ 、 $F_z$ に変数変換し、スリップ角 $\alpha^\circ$ が微小な角度である場合、 $R_0$ について解くと、操舵時の横力を補正するための式(5.2)となる。そして、 $R_0$ を $F_z$ で割ることでRRCを求める。

$$R_0 \approx \left( R_c - \frac{F_c^2}{k_y} \right) / \left\{ 1 + \left( \frac{F_c}{F_z} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5.2)$$

(3) 基準温度および基準速度補正の検討

図-9に結果の一部として低燃費舗装Type1のRRCとタイヤ温度との関係を速度別に示す。図よりRRCはタイヤ温度と負の相関、走行速度と正の相関があり、また、この結果から基準温度/基準速度への補正式を開発した。

6. 路面プロファイルを用いたタイヤ/路面転がり抵抗の間接評価方法に関する検討

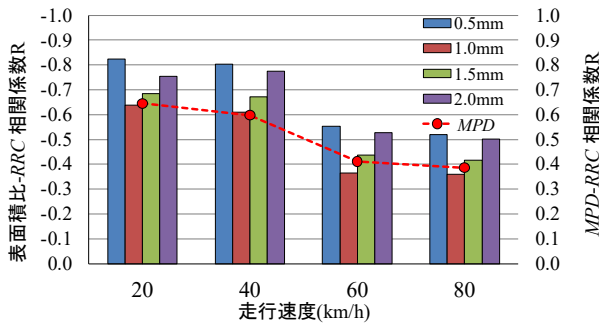


図-10 RRCと表面積率・MPDの相関係数

表-1 各 LEVELのRMSとRRCの相関係数

波長領域 LEVEL	速度 (km/h)			
	20	40	60	80
$d_3$	0.75	0.80	0.70	0.66
$d_4$	0.69	0.79	0.76	0.70
$d_5$	0.74	0.85	0.66	0.69
$d_6$	0.80	0.89	0.75	0.74
$d_7$	0.68	0.68	0.71	0.68
$d_8$	0.31	0.36	0.46	0.51
$d_9$	0.01	0.13	0.46	0.24
$d_{10}$	-0.05	0.05	0.40	0.25
$d_{11}$	0.05	0.10	0.28	0.02
$d_{12}$	0.15	0.26	0.48	0.29

本検討は実用化を視野に入れて、舗装調査・試験法便覧にある指標を用い、アスファルト舗装路面23種類を対象に検討を行った。テクスチャ指標としてTD(Texture Depth)とMPD、ラフネス指標として平坦性とIRIについてそれぞれRRCと重回帰分析を行い、結果MPDとIRIとの相関係数が大きくなった。次に、MPDとIRIの2つを説明変数としRRCとの重回帰分析を20、40、60、80km/hの速度別に行った。走行速度60km/hの関係式を式(6.1)に示す。なお、相関係数は20~80km/hで0.71~0.85となった。

$$RRC = 0.0178 + 0.0032 \log_e(IRI) + 0.0006MPD \quad (6.1)$$

## 7. 路面プロファイルを用いた間接評価方法の精度向上に向けた検討

### (1) 路面プロファイルとタイヤ/路面転がり抵抗の関係

本検討は、上記検討結果を受けて間接評価方法のさらなる精度向上と路面プロファイルとの関係解明を目的に、コンクリート舗装も含めた26路面を対象に行った。まず、テクスチャ指標としてはタイヤと路面の接地面に着目し検討した。結果を図-10に示す。図より路面のピーク高さから0.5mm下がりの表面積率がタイヤ/路面転がり抵抗(RRC)との関係が強いことが分かった。

次に、ラフネス指標としては路面プロファイルウェーブレット解析後、抽出した波形の実効値(RMS: root mean square)を求めて検討した。結果を表-1に示す。表-1より波長0.08mから5.12mの関係が強いことが分かった。

そして、0.5mm表面積率と波長0.08~5.12mのRMSを説明変数とし、RRCを目的変数として重回帰分析を行った。結果、相関係数は走行速度20~80km/hで0.74~0.89となった。また、本分析結果により路面プロファイルがRRCに及ぼす影響は、速度が大きくなると、ラフネス波長領域の影響割合が大きくなることが分かった。

表-2 路面プロファイルとRRCの重回帰分析結果

速度 (km/h)	項目	$X_1: \log(0.5\text{mm表面積比}), X_2: RMS_{0.08}$			$X_1: MPD, X_2: IRI$		
		重相関係数	係数	t( t >2)	重相関係数	係数	t( t >2)
20	切片	0.85	0.01076	16.7	0.70	0.01397	28.4
	$X_1$		-0.00061	-6.0		0.00072	3.9
	$X_2$		0.00160	2.3		0.00056	1.9
40	切片	0.89	0.01161	18.5	0.69	0.01529	27.4
	$X_1$		-0.00070	-7.1		0.00072	3.5
	$X_2$		0.00194	2.9		0.00076	2.2
60	切片	0.74	0.01456	12.8	0.77	0.01654	26.8
	$X_1$		-0.00048	-2.7		0.00050	2.2
	$X_2$		0.00407	3.3		0.00182	4.9
80	切片	0.74	0.01654	12.6	0.63	0.01931	22.5
	$X_1$		-0.00048	-2.3		0.00058	1.8
	$X_2$		0.00510	3.6		0.00161	3.1

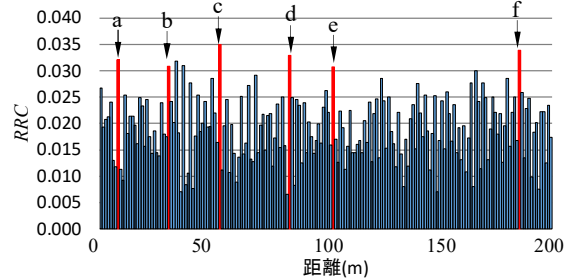


図-11 局所的なRRCの算出結果

### (2) 路面プロファイルとタイヤ/路面転がり抵抗との関係に対する速度の影響

本検討では速度の影響について検討するために、1m間毎のRRCを算出し、局所的な位置における速度毎の変動を分析した。結果の一部を図-11に示す。結果、同じ舗装区間内でも位置により変動があり、速度が増加すると特定の位置においてRRCが大きくなった。これをもとに検討した結果、速度増加に伴うラフネス波長領域の影響割合が大きくなる要因は特定の位置や形状である可能性を見出した。

## 8. 結論

本研究で得られた知見の主なものを以下に示す。

- タイヤ/路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装の構築方法を実証し、すべり抵抗および実道での耐久性に問題ないことを確認した。
- 低燃費舗装のCO<sub>2</sub>排出量について試算した結果、日本全国の幹線道路に適用した場合において、従来舗装よりも年間100万tの削減効果があることを示した。
- タイヤ/路面転がり抵抗係数の直接評価方法として、すべり抵抗測定車を用いる方法、間接評価方法としてMPD、IRIを用いる方法について提案した。
- 間接評価方法の高度化について検討し、0.5mm表面積比やRMS<sub>0.08</sub>といったタイヤ/路面転がり抵抗に影響を及ぼす指標を見出した。また、特徴的な路面形状が速度依存の要因の一つである可能性を見出した。

## 参考文献

- (社)日本道路協会:舗装設計施工指針,丸善,2006.
- 酒井秀男:改訂タイヤ工学 入門から応用まで,グランプリ出版,1987.
- PIARC: Technical Committee Report on Surface Characteristics, 1978.