

# 自動車走行燃費の改善に向けた アスファルト舗装技術の開発

石垣 勉・川上 篤史・久保 和幸

平成 25 年 3 月に地球温暖化対策の推進に関する法律（以下、「温対法」という）が改正され、地球温暖化対策に引き続き積極的に取り組んでいくことが求められている。自動車の燃料消費に伴う CO<sub>2</sub> 排出量は、わが国全体の排出量の約 2 割を占めていることから、自動車走行燃費の改善を図る技術の開発と普及は、CO<sub>2</sub> 排出量の低減に向けて有効といえる。燃費に影響を及ぼす走行抵抗のうち、転がり抵抗は舗装路面に直接起因する走行抵抗である。したがって、路面の転がり抵抗を低減することで、自動車走行燃費の改善を図ることが期待できる。本稿では、筆者らが開発した低転がり抵抗性をもつアスファルト舗装（以下、「低燃費舗装」という）について、そのメカニズムを中心に、性能確認結果、および低燃費舗装による燃費改善効果と CO<sub>2</sub> 排出量抑制効果の試算結果を紹介する。

キーワード：地球温暖化対策、CO<sub>2</sub> 排出量、自動車走行燃費、転がり抵抗、低燃費舗装

## 1. はじめに

世界のエネルギー起源 CO<sub>2</sub> 排出量は約 300 億 t であり、わが国の排出量が占める割合は約 4% である<sup>1), 2)</sup>。今後、発展途上国の経済活動の進展などにより、世界の CO<sub>2</sub> 排出量は増加する見通しである。現代において大気中の温室効果ガス濃度を安定化させ、地球温暖化を防止することは、経済活動と地球環境が調和した持続可能な社会を形成していくための世界共通の課題として認識されている。

平成 25 年 3 月に改正された温対法では、わが国の社会経済活動による温室効果ガスの排出の抑制等を促進するための措置を講ずることで、地球温暖化対策の推進を引き続き積極的に図ることが示されている。そこで運輸部門では、地球温暖化対策として環境負荷の少ない自動車の普及・使用の促進や自動車から環境負荷の少ない公共交通機関への誘導といった対策の考え方が示されている<sup>3)</sup>。

わが国の運輸部門における CO<sub>2</sub> 排出量は、全体の約 19% である。この内、自動車の燃料消費に伴う CO<sub>2</sub> 排出量の占める割合は、運輸部門の約 88% であり、わが国全体の約 16% を占めている<sup>3)</sup>。つまり、自動車走行燃費の改善に向けた技術の開発と普及は、運輸部門の地球温暖化対策の強化において有効であることは明らかである。

ところで、自動車の燃量消費量を変動させる主要因

は、走行抵抗と考えられている。走行抵抗とは、自動車の進行方向と反対向きに作用する力であり、主に転がり抵抗、空気抵抗、勾配抵抗、および加速抵抗の 4 つの抵抗により構成される<sup>4)</sup>。この走行抵抗を低減することで、自動車走行燃費の改善を図ることが期待できる。

転がり抵抗とは、転動するタイヤと舗装路面の接触面において、タイヤが路面から進行方向と反対向きに受ける力であり<sup>4)</sup>、舗装路面に直接起因する走行抵抗と考えられる。したがって新たな舗装の技術的アプローチとして、低転がり抵抗性を有するアスファルト舗装（低燃費舗装）を開発することで、走行抵抗の低減を図り、自動車走行燃費の改善と CO<sub>2</sub> の排出量の抑制を図ることが期待できる。

筆者らは、平成 21 年度から平成 25 年度に実施した共同研究「低炭素舗装技術の高度化に関する研究」において、低燃費舗装の開発を進めてきた<sup>5)~7)</sup>。本稿は、筆者らが開発した低燃費舗装のメカニズムを中心に、性能確認結果、および低燃費舗装による燃費改善効果と CO<sub>2</sub> 排出量の試算結果について述べる。

## 2. 低燃費舗装のメカニズム

転がり抵抗は、転動するタイヤと舗装路面の接触面において、タイヤトレッド面のゴムが圧縮・変形することで生じるひずみによる損失エネルギーと、路面の平坦性の影響により、タイヤサイドウォール部のゴ

ムが変形することで生じるひずみによる損失エネルギーの和と考えられている<sup>4)</sup>。そこで、タイヤ技術による主な転がり抵抗低減方法は、トレッド面のゴムのエネルギーロスの低減、タイヤ剛性の向上、および空気圧の高内圧化などの方法によって、損失エネルギーを低減する技術と考えられている。

既往の研究<sup>8), 9)</sup>において、路面プロファイルと路面性能との関係が整理されている。これによれば、転がり抵抗はマクロテクスチャ（波長 0.5 ~ 50 mm）からメガテクスチャ（波長 50 ~ 500 mm）の範囲の振幅と、ラフネス・アンイーブンネス（波長 500 mm 以上）の振幅と正の相関があることが示されている。マクロテクスチャからメガテクスチャ領域の振幅は、主にアスファルト混合物の骨材の最大粒径や粒度などのアスファルト混合物の配合が支配的な要因となるのに対して、ラフネス・アンイーブンネス領域の振幅は、舗装の施工に起因する平坦性が要因と考えられる。

図-1に、路面テクスチャの区分を示す。図-1(a)に示すポジティブテクスチャ（positive texture）とは、「骨材が露出した状態（いわゆる凸）のテクスチャ」であり、経年変化した密粒度アスファルト舗装によく見られるテクスチャである。図-1(b)に示すネガティブテクスチャ（negative texture）とは、「骨材を表面に緻密かつ平滑に並べた（いわゆる凹）テクスチャ」と定義される。ネガティブテクスチャは、すべり抵抗の確保、車内・車外騒音の低減、および水煙・水はねの抑制などの高度な機能性をもつ舗装の要素技術として、イギリス（Thin Wearing Course System）やフランス（Ultra-Thin Rough Asphalt）においてその普及が進んでいる。

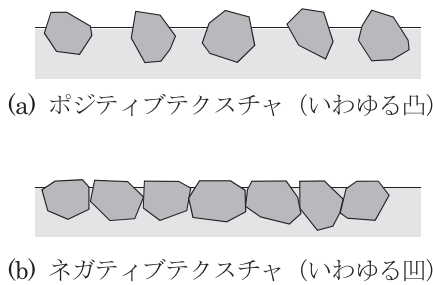
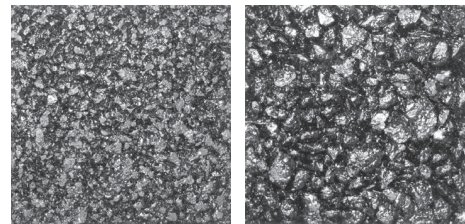


図-1 路面テクスチャの区分

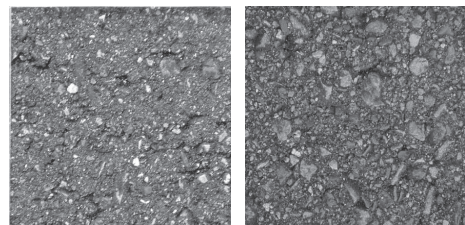
本研究で開発した低燃費舗装は、このネガティブテクスチャを適用している。表-1に低燃費舗装の粒度範囲、写真-1に低燃費舗装と従来舗装の路面比較を示す。粒度範囲は、排水性（5）と SMA（5）の中間的な粒度である。低燃費舗装の技術的特徴として、骨材最大寸法を 5 mm とし、欧州で採用されている骨材最大寸法（14 mm または 10 mm）よりも小粒

表-1 低燃費舗装の粒度範囲

仕上厚 (cm)	2 ~ 3	
最大粒径 (mm)	5	
百分率通過質量	13.2 mm	100
	4.75 mm	90 ~ 100
	2.36 mm	20 ~ 40
	0.075 mm	5 ~ 10
バインダー種別	ポリマー改質 H 型 同等以上	
アスファルト量 (%)	5 ~ 6	
空隙率 (%)	10 ~ 18	



(a) 低燃費舗装 (b) 排水性(13)



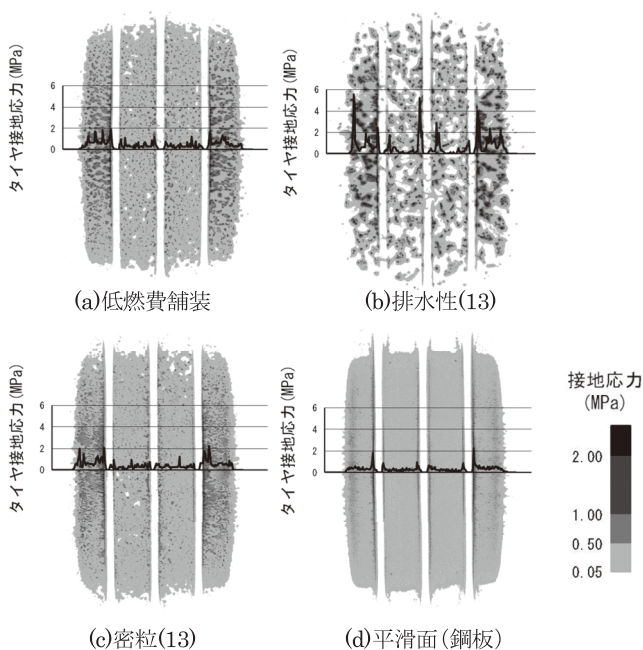
(c) 密粒(13) (d) 経年変化した密粒(13)

写真-1 低燃費舗装と従来舗装の路面比較

径化を図ることで、マクロテクスチャからメガテクスチャ領域の振幅の更なる低減を図るとともに、空隙をもたせることで適度な排水性や低騒音性を確保した点があげられる。

低燃費舗装の転がり抵抗低減メカニズムの検討を目的に、各種路面におけるタイヤ接地応力を測定した。図-2に、各種路面のタイヤ接地応力分布を示す。試験体は、本研究で開発した低燃費舗装、排水性(13)、密粒(13)、および平滑面（鋼板）とした。試験に用いたタイヤは、すべり抵抗測定標準リブタイヤ（ASTM 準拠、タイヤ規格 165SR13、空気圧 0.176 MPa）とした。タイヤ接地応力の測定には、圧力測定範囲の異なる 3 種類の感圧フィルムを用いた。感圧フィルムを試験体表面とタイヤの間に敷設し、室内タイヤ静的載荷装置により静的鉛直荷重（3969N）に載荷した。感圧後の各フィルムを圧力画像解析装置で読み込み、これらの解析結果を合成することにより、タイヤ接地応力分布を作成した。図-2中には、圧力画像解析で得られたタイヤ重心位置の横断面におけるタイヤ接地応力をあわせて示した。

図-2より、タイヤ接地応力分布は、路面の違い



図一 各種路面におけるタイヤ接地応力分布

により大きく異なっていることがわかる。タイヤ接地応力 0.05 MPa 以上の面積は、排水性 (13)、低燃費舗装、密粒 (13)、平滑面の順で大きくなっている。平滑面のタイヤ接地応力 0.05 MPa 以上の面積を 1 とした場合、低燃費舗装の面積比は 0.97、密粒 (13) の面積比は 0.99 であり、平滑面と近い接地面積であるのに対して、排水性 (13) は 0.86 であり、その面積が大幅に低下している。これに対して、タイヤ接地応力 1MPa 以上の面積は、排水性 (13)、低燃費舗装、密粒 (13)、平滑面の順で小さくなっている。平滑面のタイヤ接地応力 1 MPa 以上の接地面積を 1 とした場合、密粒 (13) の面積比は 4.8、低燃費舗装は 6.5 に対して、排水性 (13) は 13.0 であり、低燃費舗装の 2 倍となっている。タイヤ重心位置の横断面におけるタイヤ接地応力は、各路面ともにタイヤトレッド面の端部と縦溝の近傍に高い接地応力が発生していることがわかる。これは一般的な空気入りタイヤの共通の特性である<sup>4)</sup>。平滑面、密粒 (13) および低燃費舗装の接地応力レベルの最大値は 1.5 ~ 2 MPa 程度であるのに対して、排水性 (13) は 5.5 MPa の高い接地応力が発生している。この局所的な高い接地応力の発生は、いずれの試験体も露出した骨材上であるが、露出する骨材の最大粒径が大きい排水性 (13) は、高い応力レベルとなっていることがわかる。したがって、排水性 (13) におけるタイヤトレッド面の圧縮・変形量は、低燃費舗装や密粒 (13) と比較して大きく、タイヤトレッド面に生じるひずみによる損失エネルギーは大きいものと考えられる。

上記の検討結果より、低燃費舗装の転がり抵抗低減メカニズムを、「骨材の小粒径化によるネガティブテクスチャの高度化と高い平坦性を確保することで、タイヤトレッド面のゴムを圧縮・変形させる局所的なタイヤ接地応力の発生とその面積を従来の舗装よりも抑制することができる。これによりタイヤに生じるひずみによる損失エネルギーの発生を抑制することで、転がり抵抗を低減するもの」と筆者らは考えている。

なお、密粒 (13) は供用初期において転がり抵抗が小さいと考えられるが、経年変化によるポジティブテクスチャ化 (写真一 (d) を参照) により、転がり抵抗は増加していくものと考えられる。

### 3. 低燃費舗装の性能確認

写真一 2 に、国土技術政策総合研究所の試験走路直線部において実施した低燃費舗装の試験施工状況を示す。低燃費舗装の施工方法の主な特徴は、アスファルトフィニッシャーによる均一な敷均しにより、緻密に形成されたネガティブテクスチャを、ニーディング作用が伴うタイヤローラによる締固めを用いず、線荷重のタンデムローラのみを使用することで、これを保持することである。



写真一 2 低燃費舗装の試験施工状況

表一 2 に、各種路面の転がり抵抗と路面性状測定結果<sup>7)</sup>を示す。転がり抵抗の測定方法は、すべり抵抗測定車 (ASTM 準拠、タイヤ規格 165SR13、空気圧 0.176 MPa、載荷重 3969N) による方法を用いた。転がり抵抗は、タイヤに作用する鉛直荷重に対して、ほぼ比例して増加する性質がある。そこで、転動する試験輪のけん引力を転がり抵抗 (F) とみなし、鉛直荷重 (W) で除すことにより、転がり抵抗係数 ( $\mu_r = F/W$ ) を算出した。既往の知見<sup>4)</sup>により、転がり抵抗係数はタイヤ温度依存性がある。そこで、タイヤ温度を 30℃ に補正<sup>10)</sup>した  $\mu_r$  を表一 2 に示した。

表一 各種路面の転がり抵抗と路面性状の測定結果 (国土技術政策総合研究所 試験走路)

路面種別	細別	転がり抵抗係数 $\mu_r$ (30°C)					路面性状データ						
		20 km/h	40 km/h	60 km/h	80 km/h	100 km/h	MPD (mm)	SMTD (mm)	$\sigma$ (mm)	IRI (mm/m)	BPN	現場透水量 400 ml/15 s	
A	排水性 (13)	新設	0.0166	0.0198	0.0222	0.0260	0.0287	1.47	1.29	0.75	1.13	66	1028
B	排水性 (13)	既設	0.0167	0.0187	0.0212	0.0237	0.0280	1.66	1.30	0.92	1.25	59	1226
C	排水性 (5)	既設	0.0156	0.0182	0.0210	0.0242	0.0283	0.85	0.59	1.61	1.49	64	1377
D	密粒 (20)	新設	0.0163	0.0191	0.0226	0.0269	0.0289	0.36	0.26	1.11	2.18	73	-
E	密粒 (13)	既設	0.0165	0.0182	0.0210	0.0242	0.0283	0.45	0.26	0.76	1.25	70	-
F	密粒 (13)	既設	0.0157	0.0182	0.0210	0.0242	0.0283	0.29	0.21	0.75	1.04	79	-
G	連続鉄筋コンクリート	既設	0.0170	0.0200	0.0227	0.0253	0.0280	0.34	0.17	1.08	1.51	68	-
H	低燃費舗装 (二層同時施工)	新設	0.0148	0.0174	0.0196	0.0245	0.0260	0.56	0.41	0.87	1.00	79	865
I	低燃費舗装 (乳剤散布式)	新設	0.0150	0.0170	0.0191	0.0240	0.0271	0.57	0.41	0.54	0.91	71	1053

表一 2 より、転がり抵抗係数は速度依存性があり、走行速度が速いほど転がり抵抗係数が増加していることがわかる。このことは、転がり抵抗係数の走行速度依存性は小さいとするタイヤの室内転がり抵抗試験の知見<sup>4)</sup>と異なっている。これは、タイヤの室内転がり抵抗試験では、回転ドラムの平滑面上において転がり抵抗を測定しているのに対して、実際の舗装上での測定は、ラフネス・アンイーブンネス波長域において振幅をもつ路面上で測定していることに起因し、走行速度が速いほど、ラフネス・アンイーブンネス波長域の影響度が大きくなることによるものと推察される。

転がり抵抗係数  $\mu_r$  は路面種別により異なっていることがわかる。低燃費舗装の転がり抵抗は、他の舗装と比較して小さい値を示している。ここで、排水性 (13) と低燃費舗装の走行速度 60 km/h における転がり抵抗係数  $\mu_r$  を比較すると、排水性 (13) の  $\mu_r$  は 0.0222 に対して、低燃費舗装の  $\mu_r$  は 0.0191, 0.0196 となっている。このことから低燃費舗装は、一般国道や都市内道路において従来舗装として適用されている排水性 (13) に対して、約 12 ~ 14% の転がり抵抗低減効果を期待できることがわかる。

転がり抵抗係数  $\mu_r$  と路面性状の関係として、転がり抵抗係数とすべり抵抗性 (BPN) の相関は見られない。このことは、既往の知見<sup>8)</sup>を裏付けている。転がり抵抗係数  $\mu_r$  と舗装のテクスチャの指標であるきめ深さ (MPD) は負の相関があり、平坦性の指標である IRI とは正の相関がある。このことは、筆者らの既報<sup>6)</sup>でも示したように、これらの指標を用いることで転がり抵抗の予測に活用できる可能性をうかがい知ることができ、今後更なるデータの収集を図り、検証していく必要がある。

#### 4. 低燃費舗装による燃費改善効果と CO<sub>2</sub> 排出抑制効果の試算

表一 3 に、低燃費舗装による自動車走行燃費改善率の試算結果を示す。試算条件として、比較対象を排水性 (13) とし、低燃費舗装の適用による転がり抵抗低減率を 14% と設定した。燃費向上率の試算には、JATMA<sup>11)</sup> が示した転がり抵抗の燃費寄与率に転がり抵抗低減率 (14%) を乗ずることで算出した。表一 3 より、実際の走行条件に近いモード燃費試験走行の燃費向上率より、平均で約 2% 程度の改善が期待できる試算結果となっている。

筆者らは、既報<sup>6)</sup>において低燃費舗装の適用による CO<sub>2</sub> 排出量抑制効果は、交通量の多い路線ほど効果的であることを示した。そこで、本稿では低燃費舗装の重交通路線への適用を想定した CO<sub>2</sub> 排出量抑制効果を試算した。表一 4 に、従来舗装と低燃費舗装による CO<sub>2</sub> 排出量の試算結果を示す。試算条件として、日交通量 3 万台 (大型車混入率 15%) の重交通路線に低燃費舗装を適用するものとした。排水性 (13) における小型車 (ガソリン車) と大型車 (ディーゼル車) の燃費を 10 km/L および 3 km/L と設定した。

表一 3 低燃費舗装による燃費改善率試算結果

走行条件	転がり抵抗燃費寄与率 (%) : A	転がり抵抗低減率 (%) : B	燃費向上率 (%) : A × B
一定速度走行	20 ~ 25	14	2.8 ~ 3.5
モード燃費試験走行	10 ~ 20	14	1.4 ~ 2.8
一般市街地走行	7 ~ 10	14	0.7 ~ 1.8

表一 4 従来舗装と低燃費舗装による CO<sub>2</sub> 排出量の試算結果

	従来舗装 (排水性 (13))		低燃費舗装		計算式
	小型車	大型車	小型車	大型車	
(A) 走行燃費 (km/ℓ)	10	3	10.2	3.06	設定
(B) CO <sub>2</sub> 排出量/台 (kg-CO <sub>2</sub> /100 km・台)	23.2	85.3	22.7	83.7	小型車: 2.32/A*100 大型車: 2.56/A*100
(C) 交通量 (台/日): (C)	25,500	4,500	25,500	4,500	試算条件
(D) CO <sub>2</sub> 排出量/日 (t-CO <sub>2</sub> /100 km・日)	591.6	383.9	578.9	376.7	B × C/1000
(E) CO <sub>2</sub> 排出量/年 (t-CO <sub>2</sub> /100 km・年)	215,934	140,124	211,298	137,496	D × 365
合計 (t-CO <sub>2</sub> /100 km・年)	356,058	348,794	348,794		

低燃費舗装の燃費は、前述の燃費向上率の平均値(2%)をもとに、排水性 (13) の燃費にそれぞれ 1.02 を乗じたものを設定した。ガソリンとディーゼル燃料の CO<sub>2</sub> 排出係数は、2.32 kg - CO<sub>2</sub>/L および 2.56 kg - CO<sub>2</sub>/L と設定し、路線延長 100 km、1 年あたりの CO<sub>2</sub> 排出量を試算した。

表一 4 より、路線延長 100 km、1 年あたりの排水性 (13) のケースにおける CO<sub>2</sub> 排出量は約 35.6 万 t、低燃費舗装では約 34.9 万 t であり、低燃費舗装による CO<sub>2</sub> 排出抑制効果は約 7000 t と試算される。この試算結果より、低燃費舗装を交通量の多い一般国道、都市内高速道路および都市内幹線道路に適用することで、わが国の運輸部門における CO<sub>2</sub> 排出量抑制に一定の効果が期待できるものと考えられる。

### 5. おわりに

本稿では、筆者らが開発した低燃費舗装について、そのメカニズムを中心に、性能確認結果、および低燃費舗装による燃費改善効果と CO<sub>2</sub> 排出抑制効果の試算結果を紹介した。舗装の技術的アプローチによる自動車走行燃費の改善および CO<sub>2</sub> 排出量抑制は、環境負荷の少ない自動車の普及・使用といった自動車単体対策との相乗効果も期待できる。今後更なるデータの収集を図り、効果の検証を進めるとともに、実路適用に向けた取り組みを進めていきたい。



### 【参考文献】

- 1) 環境省：世界のエネルギー起源 CO<sub>2</sub> 排出量，環境省 HP <http://www.env.go.jp>
- 2) 環境省：2011 年度温室効果ガス排出量（速報値），環境省 HP <http://www.env.go.jp>
- 3) 国土交通省総合政策局環境政策課：運輸部門における地球温暖化対策，平成 25 年 9 月，国土交通省 HP <http://www.mlit.go.jp>
- 4) 酒井秀男：改訂版タイヤ工学，グランプリ出版（2002）
- 5) 川上篤史，新田弘之，寺田剛，久保和幸：低炭素社会に貢献する舗装技術 - 低燃費舗装の CO<sub>2</sub> 排出量削減効果の試算等，土木技術資料，Vol.55, No.1, pp.24-27 (2013.1)
- 6) 川上 篤史，寺田 剛，久保 和幸，石垣勉：低燃費舗装の要求性能に関する検討，第 30 回日本道路会議論文集，No.3069 (2013)
- 7) 石垣勉，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なアスファルト舗装技術の開発，第 30 回日本道路会議論文集，No.3068 (2013)
- 8) Henry, J.J. :Evaluation of pavement friction characteristics. NCHRP Synthesis of Highway, Practice 291. Washington, D.C.: Transportation Research Board. (2000)
- 9) Descornet, G.: Road-Surface Influence on Tire Rolling Resistance, ASTM STP 1031, pp. 410 -415,ASTM, (1990)
- 10) Janssen,M.L. & Hall,G.L. : Effect of Ambient Temperature on Radial Tire Rolling Resistance, SAE No. 800090, SAE, (1980)
- 11) 低燃費タイヤ普及促進協議会：低燃費タイヤ等に関する普及のあり方について（2009.7）

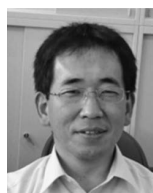
### 【筆者紹介】



石垣 勉 (いしがき つとむ)  
 (株) NIPPO  
 総合技術部 技術研究所 研究第一グループ  
 主任研究員



川上 篤史 (かわかみ あつし)  
 (株) 土木研究所  
 道路技術研究グループ 舗装チーム  
 主任研究員



久保 和幸 (くぼ かずゆき)  
 (株) 土木研究所  
 道路技術研究グループ 舗装チーム  
 上席研究員