

7.2 低炭素社会を実現する舗装技術の開発および評価技術に関する研究①

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：舗装チーム

研究担当者：久保和幸、寺田剛、川上篤史、
平川一成

【要旨】

低炭素社会の実現に向け、舗装分野においても CO₂ 削減技術・工法が開発が進められている。本研究は、①低炭素社会を実現する舗装材料、舗装工法の開発、および②舗装工法等の LCCO₂ 評価技術の提案を行うことを目的とする。①低炭素社会を実現する舗装材料、舗装工法の開発では、1) 低炭素化舗装工法の改良および 2) 低燃費舗装の開発を行った。また、②舗装工法等の LCCO₂ 評価技術の提案では、3) 低炭素舗装技術に位置づけられている既存技術のライフサイクル CO₂ 分析による定量評価、および 4) 低燃費舗装の評価方法として自動車から排出される CO₂ 排出量も考慮に入れたライフサイクル評価手法を適用することを検討した。

研究の結果、1) 低炭素化舗装工法の改良では、チップシール工法の高耐久化技術を開発した。2) 低燃費舗装の開発では、骨材の配合及び施工方法の工夫によって、転がり抵抗の少ない舗装（低燃費舗装）技術を開発した。3) 既存技術のライフサイクル CO₂ 分析による定量評価では、様々な低炭素舗装技術についてライフサイクル CO₂ と寿命（ライフサイクルスパン）の関係を明らかにした。また、4) 低燃費舗装の自動車の CO₂ 改善効果を検討するには、拡張ライフサイクル CO₂ 評価手法（EL-CO₂）の適用により定量的に評価できることを明らかにした。

キーワード：低炭素舗装、低燃費舗装、タイヤ／路面転がり抵抗、中温化技術、LCCO₂

1. はじめに

地球温暖化対策の一環として、近年様々な舗装技術が低炭素社会を実現する舗装技術（以下、低炭素舗装技術）として見直されてきている。日本道路協会「環境に配慮した舗装技術に関するガイドブック」¹⁾（以下、環境舗装ガイドブック）では、低炭素舗装技術として、加熱アスファルト混合物の製造温度低下技術、常温製造技術、長寿命化技術が挙げられている。本ガイドブックは平成 21 年に発刊されているが、発刊後も新たな低炭素舗装技術の研究・開発が進められている。低炭素社会の実現に貢献するには、低炭素舗装技術の更なる CO₂ 排出量低減が可能となる技術開発等を行うとともに、今後の普及促進のために低炭素性能を評価する手法を構築することが必要である。

本研究では、①低炭素社会を実現する舗装材料、舗装工法の開発、および②舗装工法等の LCCO₂ 評価技術の提案を行うことを目的とした。具体的には、①低炭素社会を実現する舗装材料、舗装工法の開発では、1) 低炭素化舗装工法の改良および 2) 低燃費舗装の開発を行った。また、②低炭素舗装の評価方法の開発では、3) 低炭素舗装技術に位置づけられて

いる既存舗装技術のライフサイクル CO₂ 分析による定量評価、および 4) 低燃費舗装の評価方法として自動車から排出される CO₂ 排出量も考慮に入れたライフサイクル CO₂ 評価手法の適用を検討した。

2. 低炭素社会を実現する舗装材料・舗装工法の開発

2.1 低炭素舗装技術の整理

本検討では最初に、低炭素舗装技術の体系的整理を行うとともに、現在、低炭素化舗装技術として世界的に普及して生きている中温化技術について国内外における普及・開発状況の整理を行った。

2.1.1 低炭素舗装技術の体系化整理

低炭素舗装技術の整理にあたっては、環境舗装ガイドブックに記載されている技術に加え、既存文献により CO₂ 排出量削減に資する舗装技術を幅広く抽出し整理した。既存文献は、過去 3 年程度の日本道路会議論文集や土木学会舗装工学論文集、土木学会年次講演会講演集、舗装誌、道路建設誌、あすぷあるとにゆうざい誌等を参照した。

表-1 に、環境舗装ガイドブックに記載している技術に加え（表中黒字）、既存文献等により可能性のあ

る低炭素舗装技術を抽出した（表中赤字）結果を示す。また、追加した技術の概要は次のとおりである。

常温混合物やバイオ技術など広く普及に至っていない技術も含め、低炭素舗装技術に位置づけられると考えた新たな舗装技術を※印で示した。常温製造技術の常温混合物は、特殊アスファルト乳剤等によりアスファルト混合物を製造し、常温で施工する技術である。耐久性が高くないため軽交通に用いられている技術であるが、常温で製造・施工することで加熱アスファルト混合物に比べてCO₂は少ない。

リサイクル技術の常温プラント再生舗装工法および常温路上表層再生工法は、広義では環境舗装ガイドブックに記載されているプラント再生工法、路上表層再生工法にそれぞれ分類される技術であるが、前述の常温混合物同様、アスファルト乳剤等を用いているため耐久性は高くないものの、CO₂排出量は少ないことから別項目として記載した。

次に、CO₂固定化舗装は、コンクリート再生骨材を用いた舗装であり、コンクリート再生骨材が二酸化炭素を吸着する現象を利用したものである。本技術はまだ研究段階であり、効果および耐久性等について今後明らかにされる必要がある。

フルデプス舗装およびCAE路盤は、舗装構造の耐久性の強化によって長寿命によるCO₂削減が期待される技術であることから、長寿命技術に位置づけた。

低燃費舗装は、舗装の転がり抵抗を改善することによって自動車由来の排出ガス低減に寄与する新たな発想の舗装技術である。カナダ等で舗装の種類を変えて走行実験を行い、コンクリート舗装は剛性が高いことから、転がり抵抗が低いと報告されている²⁾。また、後述するが、本研究において新たな低燃費舗装技術として、ネガティブテクスチャ路面の形成によって転がり抵抗低減を実現した舗装技術を開発したことから、本表に追加した。

バイオ技術は、植物由来の原料で製造されたバイオバインダ³⁾やバイオマス燃料⁴⁾を用いるもので、カーボンニュートラルにより素材の製造に係るCO₂排出量は積算しないことになる。ただし、製造・輸送の過程で燃料を使えばその排出量を考慮する必要がある。アスファルト混合物の製造時にバイオ燃料をカロリー比で90%使用した場合、通常の燃料であると報告されている。

2.1.2 国内外における中温化技術の現状

中温化技術は、1995年頃に日本及び欧州で研究開

発が始まり、近年は米国などでも行われるようになり、様々な技術が開発されている。そこで、現在の海外における中温化技術の種類（分類）や実績等を調査した。参照した海外文献は、全米アスファルト協会の技術図書や中温化技術に関する国際会議論文集⁵⁾、インターネットWEB（asphalt pavement.org、warmmixasphalt.com、eapa.org、trb.org、gisbau.de等）である。

海外における中温化技術（弱加熱技術も含む）の整理結果を表-2に示す。

表-1 低炭素舗装技術の体系整理

分類		舗装技術
舗装技術	加熱アスファルト混合物の製造温度低下技術	中温化技術
		弱加熱技術(セミホット)
	常温製造技術	チップシーラー
		マイクロサーフェシング
		常温混合物 ※
	リサイクル技術	再生加熱アスファルト混合物
		常温プラント再生舗装工法(※)
		路上表層再生工法
		常温路上表層再生工法(※)
		路上路盤再生工法
	長寿命化技術	CO ₂ 固定化舗装 ※
		コンポジット舗装
		改質アスファルトの適用
		フルデプス舗装 ※
CAE路盤 ※		
低燃費舗装技術 ※	ネガティブテクスチャ路面 ※	
	平坦性の改善 ※	
材料技術	舗装の剛性強化 ※	
	バイオ技術 ※	
製造設備技術	バイオバインダ ※	
	バイオ燃料 ※	
施工機械技術	アスファルト混合物の製造効率の向上技術	
	エンジン回転数制御技術	
舗装技術	低燃費型建設機械	
	ハイブリッド建設機械 ※	
	電力駆動技術	
舗装技術	バッテリー式建設機械	
	施工の効率化技術	
		3Dマシントラック

※:環境舗装ガイドブックから新たに追加した技術

表-2 海外の中温化技術の開発状況

技術分類	技術名	概要	出荷量(万トン)	実績(国)
a. Chemical Processes	Evotherm™ (ET, DAT, 3G)	エマルジョンで加熱骨材を被膜	750	フランス、カナダ、南アフリカ、アメリカ等
	Cecabase RT	水を使用しない中温化添加剤	200	アメリカ(NCHRP Project)
	HyperTherm/QualiTherm	水を使用しない飽和脂肪酸ベースの化学系添加剤	2.8	カナダ
	Rediset WMX, Rediset LQ(Liquid)	当初固形(WMX)が開発され、2011年に液体のRediset(LQ)が開発	-	アメリカ(NCHRP Project)
b. Foaming Processes	Aspha-min	ゼオライト	30	フランス、ドイツ、アメリカ
	LEA, also EBE and EBT	一部の骨材による発泡	10	フランス、スペイン、イタリア、アメリカ
	WAM-Foam	軟らかいアスファルトで被膜した後に発泡した硬いアスファルトを添加	6	フランス、ノルウェー、カナダ、イタリア等
	この他、Advera、Duble-Barrel Green、Accu-Shear Dual Warm Mix Additive System、AQUABLACK、AquaFoam、ECOMAC、LEAB、LT Asphalt、Terex Warm Mix Asphalt、Ultrafoam GXなどがある			
c. Organic (wax) Additives added to binder or mix	Sasobit	Fischer-Tropsch ワックス	1000	ドイツおよび世界20ヶ国
	Thiopave	SEAM(Sulfur Extended Asphalt Modifier)として知られる硫黄のアスファルト改質剤	45	アメリカ(NCHRP Project)
	Licoment BS 100 (additive) or Subit (binder)	添加物またはバインダー(脂肪酸アミド)	3.8	ドイツ
	この他、Asphaltan-B、3E LT or Ecoflex、LEADCAPなどがある			

様々な技術・添加剤が開発・実用化されているが、欧米では中温化技術を以下に分類している。

- a. Chemical Processes (化学系添加剤)
- b. Forming Processes (発泡技術)
- c. Organic Additives (有機系添加物)

一方、わが国の中温化技術の分類は、環境舗装ガイドブックでは以下のとおりとしている。

- A1. 発泡剤(添加剤)を利用するもの
 - B1. フォームド技術(機械)を利用するもの
 - C1. アスファルト被膜の粘度を調整するもの
- また、道路建設業協会資料⁶⁾では以下としている。

- A2. 発泡系
- B2. 粘弾性調整系
- C2. 滑剤系

環境舗装ガイドブックが平成 21 年に発刊されたのに対して、道路建設業協会資料は平成 22 年に発刊されていることから、現在はこの分類が日本で一般的に用いられている。A1 および B1 が A2 に統合され、C2 が新たに分類された。欧米では主に材料で分類しているのに対し、日本は機能・作用で分類している。

各技術の出荷量は、a. 化学系添加剤は多いもので 750 万トン、c. 有機系添加物では 1,000 万トンが欧米で実績があるとされている。日本では、中温化技術毎の出荷量は公表されていないが、実績を合計すると 450 件 300 万 m² 程度⁶⁾であり、舗装厚を 5cm と仮定すれば約 35 万トンと推定される。国内の加熱アスファルト混合物の出荷量は年間約 5 千万トンであることから中温化混合物の使用量はまだまだ少ない。中温化技術はグリーン購入法の調達品目に指定されたことから、今後、広く普及する可能性がある。

一方、表-2 に示す技術の名称数では b. 発泡技術が非常に多くなっている。これは主に米国において、ランニングコストのかかる a, c の技術よりも、主に設備投資だけで済む b の技術が好まれた結果と考えられる。このため、米国では中温化混合物の価格は通常の加熱アスファルト混合物と同等に抑えられており、本技術の今後の普及の方向性として注目すべき点である。

2.2 低炭素化舗装工法の改良

本検討では、改良することによって CO₂ 削減効果が期待できる既存舗装技術として表面処理工法に着目し、耐久性を向上させる方法について検討した。

2.2.1 表面処理工法の概要

表面処理工法は、図-1 に示すように老化した路面

や軽微なひび割れ、摩耗などを改善する維持工法で、アスファルト乳剤と骨材を単層または複層に仕上げた散布式表面処理である。舗装の表面を再生し耐水性のある表面を得る効果もある。切削を必要としないため、廃材の搬出が無く、加熱せずに施工が可能であるため大幅な CO₂ 削減が期待できる。しかし、既存の技術では施工後数年経過すると骨材飛散が発生し、耐用年数が短くなることがある。この耐用年数を長くすることによって舗装の打ち換え頻度が少なくなり、これによりライフサイクル CO₂ が少なくなることなどを目的として検討した。

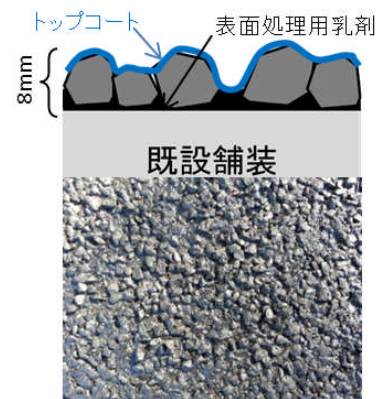


図-1 従来工法

2.2.2 検討方法

表面処理工法は、アスファルト乳剤を用いているため、耐久性が弱く適用箇所が軽交通道路となる。そこで耐久性を向上させる工法について試験施工を行い、耐久性の評価としてキメ深さと骨材飛散抵抗性の試験を行った。なお、技術の開発は、(株)ニチレキとの共同研究によるものである。

(1) 試験施工

1) 施工場所：ニチレキ(株)技術研究所構内道路 (写真-1)



写真-1 試験施工状況

2) 交通量：普通乗用車 30 台／日程度（大型交通量 2 台／日程度）

3) 検討した工法

(a) 従来工法：一層式チップシール（図-1 参照）

(b) 検討工法

① 検討A工法：骨材の動きを抑制するため下地乳剤を塗布し骨材を貫入した工法（図-2 参照）

② 検討B工法：かみ合わせを改善するため補助骨材で空隙を充填した工法（図-3 参照）

③ 検討C工法：従来工法にスラリーシールを行い、骨材飛散抵抗性を強化した工法（図-4 参照）

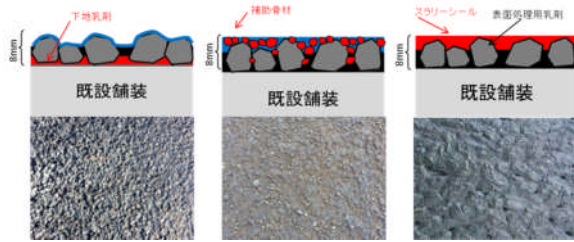


図-2 A 工法

図-3 B 工法

図-4 C 工法

(2) キメ深さの確認

サンドパッチング方法（舗装調査・試験法便覧 S022-1）に準拠しキメ深さを算出した。

(3) 骨材飛散抵抗性試験

舗設後の路面の上でステアリングによる骨材はがれ量を測定した。

2.2.3 検討結果

(1) きめ深さ

きめ深さ測定結果を図-5 に示す。

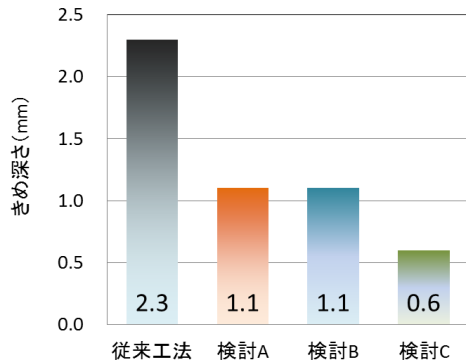


図-5 きめ深さの測定結果

この結果、従来工法はキメ深さが 2.3mm であるのに対し、今回検討した工法は 0.6mm ～ 1.1mm と小さくなっており、従来工法に比べ舗装表面の粗さは

改善され、きめ細やかになった。また、下地乳剤や補助骨材によって主骨材の間隙が充填され、骨材が飛びにくい状態であることが分かる。

(2) 骨材飛散抵抗性試験

従来工法を 100 としたステアリングによる骨材はがれ量の測定結果を図-6 に示す。この結果、今回検討した A 及び B ともいずれも従来工法に比べ約 1/3 ～ 半分程度に骨材剥がれ量が小さくなっており、耐久性が向上した結果となった。

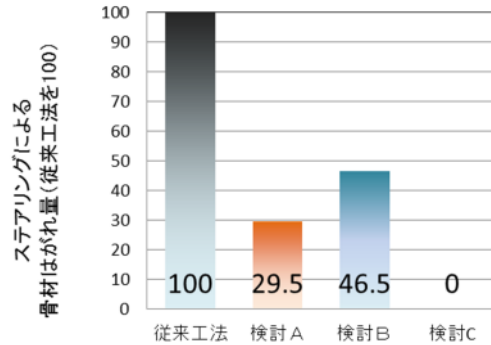


図-6 骨材はがれ量の測定結果

検討Cではきめ深さは小さく、骨材はがれ量はほぼ 0 であった。しかし、表面をシールコートを行うことで平滑な路面となったことに起因している。また施工後早期にクラックが発生していることから、維持工法として改善していく必要がある。今後も長期間の観察等により長期耐久性の確認を行っていく。

2.2.4 まとめ

表面処理工法の構造および施工方法の工夫によりキメ深さも向上し、骨材飛散抵抗性も従来工法に比べ 2～3 倍程度になり耐久性が向上することが分かった。

2.3 低燃費舗装の開発

本検討では、新たな低炭素舗装技術として、ネガティブテクスチャ路面の形成および施工法の工夫による転がり抵抗低減を実現した舗装技術を開発した。

2.3.1 低燃費舗装の開発

(1) 開発コンセプト

走行抵抗は、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⁷⁾。このうち、転がり抵抗とは、タイヤが路面を転動する際に、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。

このタイヤ/路面間の転がり抵抗を小さくすることによって自動車のCO₂排出量を低減（走行燃費を改善）することができることから、転がり抵抗を低減する新しい舗装技術として低燃費舗装を開発した。なお、本技術は(株)NIPPO との共同研究により開発したものである。

本低燃費舗装技術の開発コンセプトは、「適度なきめ深さを確保しつつ、骨材を表面に緻密にかつ平滑に並べた路面テクスチャ（ネガティブテクスチャ）を有するアスファルト混合物」である（図-6）。

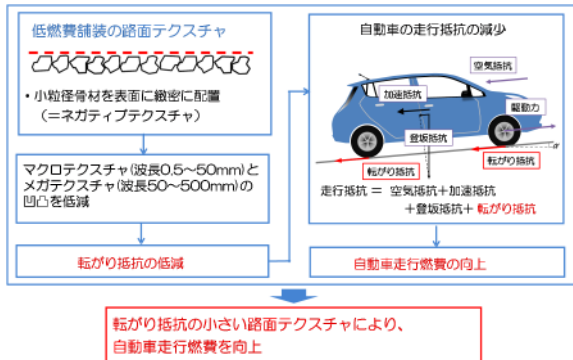


図-6 低燃費舗装のメカニズム

(2) 低燃費舗装のメカニズム

舗装の路面形状（プロファイル）は、波長によって区別することが出来る。舗装路面の転がり抵抗（および自動車の走行燃費）に与える波長領域は、マクロテクスチャ、メガテクスチャ、ラフネスの範囲（図-7）である⁸⁾とされている。

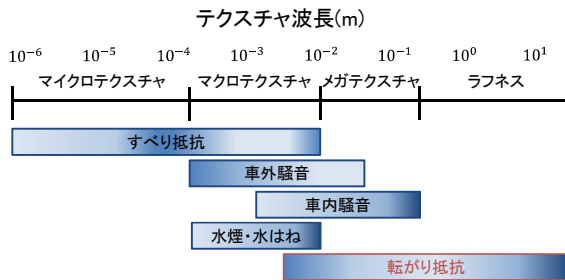


図-7 舗装路面のテクスチャ波長と影響領域⁸⁾

転がり抵抗に関連するマクロテクスチャ領域およびメガテクスチャ領域は、舗装骨材の最大粒径や路面テクスチャの凹凸形状（図-8）が関係しており、ラフネス領域は平坦性に関係していると考えられている。



図-8 路面テクスチャの凹凸形状

よって、下記の点を考慮することにより、低燃費舗装を実現した。

①ネガティブテクスチャを形成する配合設計

骨材最大寸法を 5mm と小粒径化することで、マクロテクスチャからメガテクスチャ領域の振幅の低減を図る。さらに、排水性舗装(5)と SMA(5)の中間的な配合（表-3）とすることで、適度な排水性・低騒音性・すべり抵抗性を確保する。

表-3 低燃費舗装の配合

仕上がり厚 cm	2~3	
最大粒径 mm	5	
通過百分率	13.2mm	100
	4.75mm	90-100
	2.36mm	20-40
	0.075mm	6-10
バインダー種別	ポリマー改質 H 型	
アスファルト量(%)	5-6	
空隙率 (%)	10-18	

②高い平坦性を確保する施工方法

アスファルト混合物の敷均し後の締固め時において、通常タイヤローラによってニーディング作用により締固め効果を期待するが、骨材が舗装表面から凸型に突出することを懸念した。よって、本技術では、タイヤローラを用いず、線荷重のタンデムローラのみを使用することで、高い平坦性およびネガティブテクスチャを保持する（写真 2,3,4）。



写真-2 舗設状況



写真-3 締固め状況



写真-4 施工後概観

(3) 低燃費舗装の特長

低燃費舗装の特長は以下の通りである。

- ・低燃費性：自動車の走行抵抗の一つである「転がり抵抗」の小さい路面テクスチャにより、自動車走行燃費の向上を図ることができる。
- ・二酸化炭素（CO₂）排出量の削減：自動車走行燃費の向上により、二酸化炭素（CO₂）排出量の削減を図ることができる。
- ・沿道環境保全：空隙をもつことから、排水性、水はね低減および道路交通騒音低減性を有している。
- ・車両の走行安全性：適度なきめ深さをもつことから、すべり抵抗性の向上と夜間・雨天時の視認性を有している。

2.3.2 低燃費舗装の効果に関する検討

本項では、低燃費舗装による転がり抵抗の低減性能および自動車からのCO₂排出量低減性能を明らかにするため、国土技術政策総合研究所試験走路に4種類の舗装路面各300m試験施工を行い、車載型の排出ガス計測装置により自動車からの排出ガス（以下、排ガス）および燃料消費量を直接測定してその効果を検証した。

(1) 検討方法

1) 試験工区の施工およびその路面性状

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の直線部において、表-4に示す4種類の路面性状を有する舗装を各延長300m、新たに試験施工を行い用いた。ここで、低燃費型排水性舗装(5)は先に開発した低燃費舗装（工区4）を改良し、転がり抵抗低減性を確保しつつ雨水浸透性を向上させ、新たに開発した舗装である。

表-4 試験工区とその主な路面性状

工区 舗装種別	工区			
	1	2	3	4
排水性舗装(13)	低燃費型排水性(5)	密粒度舗装(13)	低燃費舗装(5)	
工区延長 (m)	300	300	300	300
最大粒径 (mm)	13	5	13	5
平坦性σ (mm)	0.87	0.58	0.75	0.55
平均プロファイル深さMPD (mm)	1.63	0.74	0.37	0.65

2) 転がり抵抗測定

転がり抵抗の測定には、写真-5に示す垂直昇降式縦横両面型のすべり抵抗測定車を用いた。すべり測定車の概要および測定条件を表-5に示す。なお、転がり抵抗はタイヤ温度に依存することから、測定中のタイヤ温度測定には、車載の非接触式温度計を用いて、タイヤ温度を測定した。



写真-5 転がり抵抗の測定

表-5 すべり測定車の概要および測定条件

項目	内容
形式	垂直昇降式縦横両用型すべり測定装置
測定項目	牽引抵抗 (Rc), コーナリングフォース (Fc), 鉛直荷重 (Fz), 試験輪速度 (V), 試験輪温度 (T) (サンプリング間隔0.01秒)
測定輪	第5輪
測定タイヤ	すべり抵抗測定用タイヤ (リブタイヤ) タイヤ寸法: 165-SR13, タイヤ内圧176.5kPa
載荷重	4,000N±150N
測定速度	20, 40, 60, 80km/h 定常走行

3) 自動車からの CO₂ 排出量および燃費の測定

測定は、試験路面上において写真-6 に示す試験車両を定速走行させ、表-6 に示す国土技術政策総合研究所所有の排ガス計測システム（写真-7）等を用いて排ガスおよび燃料消費量等を計測した。

表-6 排ガス測定に係る装置

計測項目	計測装置	型式
排ガス	車載型排出ガス計測システム	OBS-2200
燃料消費量	燃料消費計	FC-9521
タイヤ温度	設置型非接触温度計	CS-30TAC
試験速度	GPS速度計	LC-8100
風向風速	風向風速計	WMT52



写真-6 排ガス測定実験車両外観



写真-7 排出ガス計測装置

試験車両は、総排気量 3500CC のガソリン車で、燃料消費率は 10・15 モードで 8.20[km/L]である。走行速度は、20,40,60,80km/h の 4 条件とした。排ガスは、CO、CO₂、THC、NO_x 等の排ガス濃度を連続測定した。記録周期は 10Hz である。CO₂ 排出量は、排ガス中の CO₂濃度や排ガス流量等により次式によって算出される。

$$CO_{2MASS}(t) = C_{EXCO_2}(t + DT_{CO_2}) \times M_{CO_2} \times Q_{EX}(t) \times \frac{1}{60} \times \frac{1}{100} \times \frac{1}{22.415} \times \frac{273.15}{293.15}$$

(式 1)

ここに、CO_{2MASS}(t) : 時間 t における CO₂ 瞬時排出量

[g/s]、DTCO₂ : 流量計を基準とした CO₂ 分析計の遅れ時間[s]、CEXCO₂(t+DTCO₂) : 時間(t+DTCO₂)における排ガス中の CO₂ 濃度[vol%]、MCO₂ : CO₂ の分子量、QEX(t) : 時間 t における標準状態(293.15K、101.3kPa)の排ガス流量[L/min]

(2) 研究結果

1) 転がり抵抗低減効果

各舗装路面の転がり抵抗係数の測定結果について、速度の変化を図-9 に示す。

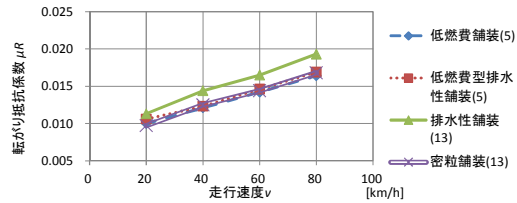


図-9 転がり抵抗係数

いずれの速度においても、排水性舗装(13)の転がり抵抗係数が高くなっており、路面テクスチャ及び平坦性が大きい路面が転がり抵抗係数が高いことが確認できた。なお、速度によって転がり抵抗係数の値が上昇しているが、その理由として路面凹凸(メガテクスチャ以上) およびタイヤ自体の空気抵抗があることが考えられる。

次に、各路面の転がり抵抗について、排水性舗装(13)からの低減率を図-10 に示す。

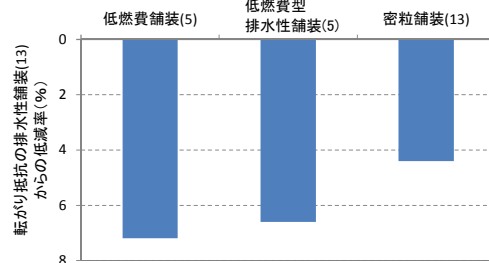


図-10 転がり抵抗の低減率

排水性舗装(13)に対する、低燃費舗装、低燃費型排水性舗装、密粒舗装(13)の転がり抵抗係数の低減率は、それぞれ約 7.2%、6.6%、4.4%となった。低燃費舗装および低燃費型排水性舗装の低減率が高かったことは、路面テクスチャの工夫・改善により転がり抵抗が低減できることを定量的に示している。なお、本実験では密粒舗装も高い低減率となったが、実験路面が施工直後で路面が平滑かつ密な状態であったためだと考えられる。密粒舗装は、このように

施工直後は転がり抵抗も小さくなるが、施工後数年経過するにつれて表面付近のアスファルトモルタル分が無くなり、ポジティブテクスチャ化することで転がり抵抗も大きくなっていくと考えている。

2) CO₂ 排出量および燃費の改善効果

自動車 CO₂ 排出量の測定結果を図-11 に示す。

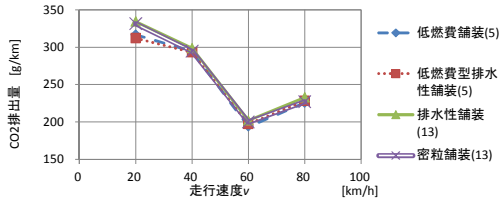


図-11 各舗装路面による CO₂ 排出量

いずれの路面も车速が上昇するにつれて排出量が減少し、60km/h を超えると再び増加した。これは、エンジン回転数およびギヤ比に関連していると考えられる。この CO₂ 排出量と転がり抵抗係数の関係を図-12 に示す。

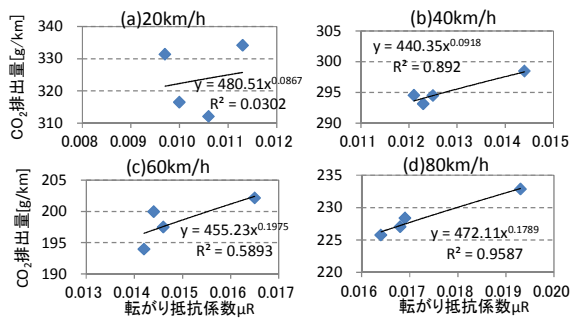


図-12 CO₂ 排出量と転がり抵抗係数の関係

20km/h を除いて両者には相関があり、転がり抵抗係数が小さな路面は CO₂ 排出量が少ないことが確認できた。なお、20km/h で明確な相関が得られなかった原因として、電子的に燃料噴射の制御がされており、定速走行においても燃料消費量が一時的に増えた可能性が挙げられる。

また、排水性舗装からの低減率を図-13 に示す。

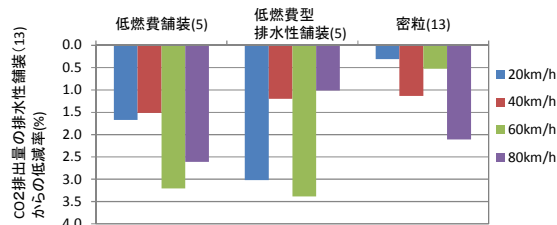


図-13 CO₂ 削減効果

速度によって差があるものの、転がり抵抗係数が大きな排水性舗装(13)に比べて低燃費舗装で 1.7~3.2%、低燃費型排水性舗装で 1.0~3.4%の削減効果があることが分かった。

次に、燃料消費量の計測結果を図-14 に示す。

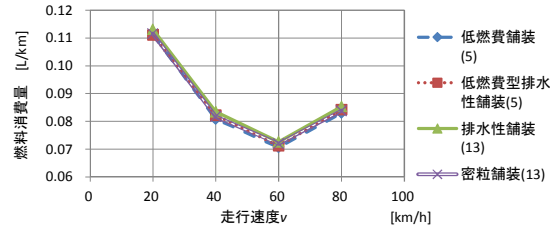


図-14 燃料消費量測定結果

CO₂ 排出量同様、60km/h で最も減少している。ここで、CO₂ 排出量と走行燃費の関係を図-15 に示す。

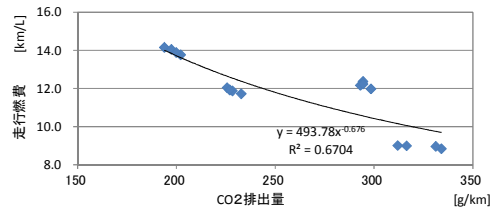


図-15 CO₂ 排出量と走行燃費の関係

これらの結果から、走行燃費は CO₂ 排出量と関連性はあると言える。さらに排水性舗装(13)に対する低減割合を算出した結果、低燃費舗装で 1.7~3.2%、低燃費型排水性舗装で 1.3~2.0%であり、自動車走行燃費向上性があることが確認された。

(3) まとめ

本検討の結果、低燃費舗装は、路面テクスチャが粗い路面(本実験では排水性舗装(13))より転がり抵抗は小さいことが定量的に示された。また、転がり抵抗の小さな路面を有する舗装は、自動車 CO₂ 排出低減性および自動車走行燃費向上性を有することが定量的に確認出来た。

2.3.3 転がり抵抗に与える影響要因の検討

タイヤ/路面転がり抵抗と舗装の路面性状の関係を検討するため、各種舗装上で惰性走行試験を行うことによって転がり抵抗係数を求め、各種舗装の路面性状測定値との関係について検討した。

(1) 検討方法

1) 試験対象とした舗装路面

試験に用いた舗装路面は、国土技術政策総合研究所構内の表-7 に示す 15 工区を対象とした。No.1～12 工区は試験走路内の直線部で、西直線路はコンポジット舗装構成、東直線路は水砕スラグ路盤である。縦断勾配は0.03～0.05%の範囲にありほぼ同等である。No.13～15 工区は外周路であり、No.13 は OWP 部分が埋戻しされた状態、No.14、15 は横断ひび割れが発生している。

表-7 試験工区の概要

No.	工区名称	舗装種別	最大粒径 (mm)	測定延長 (m)	場所
1	CON	連続鉄筋コンクリート舗装	20	60	西直線路
2	密粒①13	密粒度アスファルト舗装	13	50	東直線路
3	密粒②13	密粒度アスファルト舗装	13	60	西直線路
4	排水①13	排水性舗装	13	60	西直線路
5	排水②5	排水性舗装	5	60	西直線路
6	排水③5	排水性舗装	5	60	西直線路
7	粗SMA①13	粗面SMA舗装	13	60	西直線路
8	粗SMA②5	粗面SMA舗装	5	60	西直線路
9	排水④20-13	排水性舗装	20-13	60	西直線路
10	排水⑤10-5	排水性舗装	10-5	50	西直線路
11	密粒③13	密粒度アスファルト舗装	13	60	東直線路
12	密粒④13	密粒度アスファルト舗装	13	60	東直線路
13	密粒度⑤13	密粒度アスファルト舗装	13	50	外周路
14	密粒度⑥13	密粒度アスファルト舗装	13	60	外周路
15	密粒度⑦13	密粒度アスファルト舗装	13	60	外周路

2) 各工区の路面性状

各工区の路面性状は、すべり抵抗(動的摩擦係数)、路面プロファイル、路面テクスチャを計測した。表-8 に測定結果を示す。

表-8 各工区の路面性状

No.	工区	すべり抵抗(DPF)			路面プロファイル		路面テクスチャ(mm)			
		20 km/h	40 km/h	60 km/h	平均 α(mm)	IRI (mm/m)	MPD ※1	SMTD ※2	MPD ※3	SMTD ※3
1	CON	0.68	0.66	0.64	0.99	1.67	0.4	0.23	0.9	0.92
2	密粒①13	0.69	0.65	0.61	2.69	3.41	1.16	0.59	1.45	2.18
3	密粒②13	0.77	0.73	0.68	0.7	1.41	0.58	0.28	0.85	0.78
4	排水①13	0.5	0.47	0.45	1.03	2.45	1.59	0.83	1.96	1.69
5	排水②5	0.61	0.57	0.54	1.57	1.81	0.89	0.45	1.25	1.46
6	排水③5	0.57	0.54	0.53	1.08	2.32	0.88	0.44	1.21	1.27
7	粗SMA①13	0.6	0.52	0.46	1.33	1.79	1.05	0.66	1.61	1.8
8	粗SMA②5	0.68	0.6	0.55	1.23	1.77	0.57	0.34	0.98	1.23
9	排水④20-13	0.59	0.58	0.58	1.65	2.34	2.41	1.14	2.91	2.42
10	排水⑤10-5	0.49	0.47	0.44	1	1.62	1.33	0.77	1.79	1.51
11	密粒③13	0.72	0.67	0.65	3.4	4.79	1.32	0.64	1.59	2.5
12	密粒④13	0.83	0.79	0.74	1.04	1.59	0.33	0.23	0.59	0.88
13	密粒度⑤13	0.64	0.61	0.59	4.48	5.96	0.47	0.33	0.87	3.54
14	密粒度⑥13	0.69	0.75	0.68	2.14	2.74	0.78	0.5	1.02	1.9
15	密粒度⑦13	0.65	0.66	0.62	3.31	4.35	0.57	0.42	0.95	2.72
14	密粒度⑥13	0.71	0.67	0.65	2.47	3.97	1.26	0.75	1.56	2.14
15	密粒度⑦13	0.69	0.66	0.61	1.72	2.65	1.59	0.62	1.86	1.97

※1:測定器 CTM, ※2:測定器 MTM, ※3:測定器 MRP2000, ※4:No.13工区は、OWPが埋戻しされた箇所
で路面性状が異なるため、上段にOWP、中段にIWP、下段に平均値を記載

3) タイヤ/路面転がり抵抗の測定

舗装路面の転がり抵抗の測定は、自動車の惰性走行法とし、JIS D 1015 自動車-惰性試験方法⁹⁾を参考に行った。試験条件を表-9 に示す。普通自動車を用いて測定工区に指定速度で惰性走行を行い、経過時間および走行速度の変化を速度計により記録した。測定点での車速を変えた場合の時間を基に、減速度、試験速度および走行抵抗を算出した。最小二乗法により空気抵抗及び転がり抵抗に分け、式(2)により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た^{9,10,11)}。なお、この惰性走行試験による転

がり抵抗係数の算出は速度に依存しない方法となる。

$$\mu r = (R - \mu a AV^2) / W \quad (式 2)$$

ここで、 μr : 転がり抵抗係数

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]

表-9 惰性走行試験条件

試験条件	設定内容
工区延長	60m(一部工区50m)
測定点車速	20、40、60km/h
使用タイヤ	ブリヂストン SNEAKER SNK2 225/60R16
タイヤ空気圧	220kPa
測定回数	測定点車速1点につき10回程度
速度のサンプリング	精度:0.01km/h、0.2秒間隔

(2) 検討結果

1) 単相関分析による検討結果

各工区の転がり抵抗係数について、平均を 100 として小さい順に並び替えた結果を図-16、路面性状調査項目との単相関を表-10 に示す。転がり抵抗係数は、路面テクスチャ(SMTD)と相関が高い(R=0.86)ことが確認され、PIARCによるプロファイルの分類にも一致する。また、図-16 から最大粒径が小さくなるほど転がり抵抗係数が小さくなる傾向にある一方で、表-10において最大粒径との相関は高くない。これは、骨材の最大粒径が同じ舗装であっても、路面のキメ深さや凹凸量が密粒度混合物系と開粒度混合物系、施工後の経過年数等によって異なるため、相関が高くなかったものと推察される。そこで、開粒度系(排水性、粗面 SMA 舗装)に限定して最大粒径と転がり抵抗の関係を整理した結果、図-17 に示すとおり高い相関(R=0.92)となった。なお、すべり抵抗性は全工区を通して転がり抵抗と関係性はなかった。

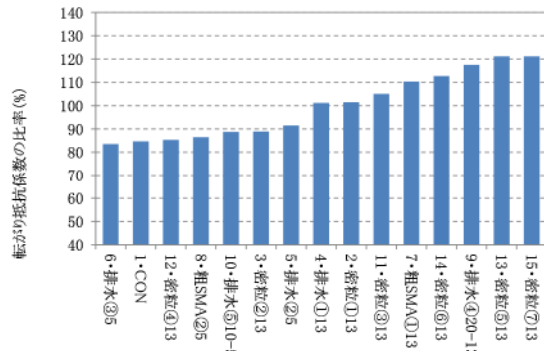


図-16 各工区の転がり抵抗係数の比率

表-10 路面性状調査項目との相関

路面性状の項目	相関係数	
最大粒径(mm)	0.40	
すべり抵抗(DFT)	20km/h	-0.05
	40km/h	0.00
	60km/h	0.02
平たん性	σ (mm)	0.62
	IRI (mm/m)	0.61
路面テクスチャ(mm)	MPD	0.56
	SMTD	0.86

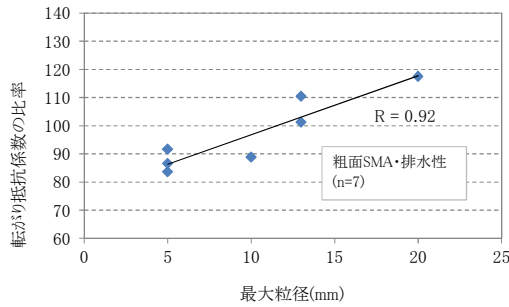


図-17 粗面 SMA・排水性舗装の最大粒径との比較

2) 重回帰分析による検討結果

転がり抵抗係数と路面性状の影響の程度を検討するため、路面性状を説明変数、転がり抵抗係数を目的変数として重回帰分析を行った。具体的な説明変数は、X1:路面プロファイル (σ 、IRI)、X2:路面テクスチャ (MPD、SMTD)、X3:最大粒径である。説明変数の組合せは4通りとなるが、「変数減少法」により説明変数の個数が最小となるまで実施した。説明変数相互の単相関係数が非常に強く関連している場合は、多重共線性の可能性があるためいずれか一方を除いて再分析した。得られる重回帰式の有意性は、自由度調整済み決定係数 (0.5 以上)、係数の有意性の検定は有意水準を 0.05 (p 値<0.05) として検討した。

転がり抵抗係数と路面性状および路面性状相互の単相関関係を表-11 に示す。

表-11 転がり抵抗係数と路面性状の単相関関係

	転がり抵抗係数	σ	IRI	MPD	SMTD	最大粒径
転がり抵抗係数	1.00	-	-	-	-	-
σ	0.62	1.00	-	-	-	-
IRI	0.61	0.95	1.00	-	-	-
MPD	0.56	0.11	0.15	1.00	-	-
SMTD	0.86	0.85	0.83	0.56	1.00	-
最大粒径	0.40	0.11	0.13	0.34	0.24	1.00

前述のとおり、転がり抵抗係数の単相関は SMTD が一番高かったが、説明変数となる σ および IRI とも相関が高いことから多重共線性の可能性が高い。次に、説明変数 X1~X3 による重回帰分析結果を表-12 に示す。

表-12 転がり抵抗係数と路面性状 (1)

項目	重相関係数 R	決定係数 R ²	自由度調整済み決定係数 R ²	係数	標準誤差	t (t>2)	p値	
分析 1	0.82	0.67	0.58	切片	0.0079	0.0011	7.1698	0.0000
				X1: MPD	0.0013	0.0006	2.3831	0.0363
				X2: σ	0.0011	0.0003	3.1577	0.0091
				X3: 最大粒径	0.0001	0.0001	1.0385	0.3213
分析 2	0.90	0.80	0.75	切片	0.0075	0.0008	8.9029	0.0000
				X1: SMTD	0.0031	0.0007	4.1066	0.0017
				X2: σ	-0.0006	0.0005	-1.2496	0.2374
				X3: 最大粒径	0.0001	0.0001	1.3053	0.2184
分析 3	0.80	0.63	0.53	切片	0.0077	0.0012	6.4306	0.0000
				X1: MPD	0.0013	0.0006	2.1381	0.0558
				X2: IRI	0.0008	0.0003	2.8139	0.0169
				X3: 最大粒径	0.0001	0.0001	1.0037	0.3371
分析 4	0.89	0.80	0.74	切片	0.0077	0.0009	9.0303	0.0000
				X1: SMTD	0.0029	0.0007	4.1073	0.0017
				X2: IRI	-0.0004	0.0004	-1.0679	0.3084
				X3: 最大粒径	0.0001	0.0001	1.3731	0.1971

分析2および4からも SMTD は多重共線性の可能性が高いことから説明変数から除外することとした (表中に網掛けのセルは除外対象である)。また、最大粒径は影響度が小さい (t 値<2) ことから除外し、説明変数 X1 は MPD、説明変数 X2 は σ および IRI で再分析した結果を表-13 に示す。

表-13 転がり抵抗係数と路面性状 (2)

項目	重相関係数 R	決定係数 R ²	自由度調整済み決定係数 R ²	係数	標準誤差	t (t>2)	p値	
分析 5	0.80	0.64	0.58	切片	0.0084	0.001	8.8783	0.000
				X1: MPD	0.0015	0.0005	2.875	0.014
				X2: σ	0.0011	0.0003	3.2438	0.007
分析 6	0.77	0.60	0.53	切片	0.0083	0.001	7.8801	0.000
				X1: MPD	0.0014	0.0006	2.6017	0.0232
				X2: IRI	0.0009	0.0003	2.9047	0.0132

分析5および6より、重回帰式自由度調整済み決定係数で 0.5 以上、各説明変数は危険率 5% で有意であり、転がり抵抗係数は、MPD と σ 、MPD と IRI を説明変数とする重回帰式で表せることが確認できた。得られた重回帰式を式(3)、(4)に示す。

・目的変数 y (転がり抵抗係数)、説明変数(X1:MPD、X2: σ)

$$y=0.0015 \text{ MPD}+0.0011 \sigma+0.0084 \dots \text{(式 3)}$$

・目的変数 y (転がり抵抗係数)、説明変数(X1:MPD、X2: IRI)

$$y=0.0014 \text{ MPD}+0.0009 \text{ IRI}+0.0083 \dots \text{(式 4)}$$

また、式(3)を例に転がり抵抗係数の予測値を算出した結果を図-18 に示す。

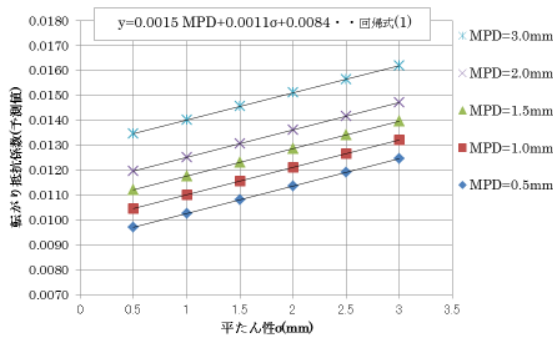


図-18 転がり抵抗係数と平たん性σ、MPDの関係

今後、低燃費舗装の開発には、このように一定のテクスチャ（MPD）になるように配合設計を行い、路面プロファイル（σまたは IRI）で舗装の出来型を管理することによって、転がり抵抗を考慮した舗装設計が期待出来ると考えられる。ここで、密粒系の舗装は、舗設時にはテクスチャが小さくなるが供用とともに路面が荒れ、次第にポジティブテクスチャになることによって、転がり抵抗は大きくなると考えられる。よって、近年の排水性舗装の必要性を考えると、今後は路面テクスチャが緻密でネガティブテクスチャを持ち、路面排水・低騒音機能を持った舗装の技術開発が望まれると考えられる。

(3) まとめ

単相関分析の結果、タイヤ/路面転がり抵抗は、①路面テクスチャと高い相関がある、②排水性および粗面 SMA に限定した場合は最大粒径と高い相関がある、③すべり抵抗性とは関連がないことが分かった。

また、重回帰分析の結果、④低炭素舗装に要求される性能は、路面プロファイル（σまたは IRI）および路面テクスチャ（MPD）によって規定することができる可能性がある、⑤これらを説明変数とする転がり抵抗係数の予測式を提案した。

ただし、本重回帰式は限られた実験結果から作成したものである。転がり抵抗係数と一番相関が高かった SMTD が路面プロファイルとも強い相関があったため統計上、重回帰分析の説明変数から除いたが、この両者の相関が高くなることは偶然である可能性がある。よって、今後の転がり抵抗のメカニズム解明には、路面性状値と転がり抵抗係数のさらなるデータを蓄積し、分析を進める必要がある。

2.3.4 転がり抵抗の新たな評価方法としてのタイヤ/路面接地応力分布に関する検討

転がり抵抗の評価には、路面のテクスチャ指標およびプロファイル指標が関連していることが分かった。しかし、これらテクスチャ指標によって、転がり抵抗に影響を及ぼす凹凸形状であるネガティブテクスチャ・ポジティブテクスチャ¹²⁾の分類についてはまだ明確な手法が定まっていないのが現状である。本検討では、このネガティブテクスチャ・ポジティブテクスチャを分類する新たなテクスチャ評価法としてタイヤ/路面間の接地応力分布に着目し、その特性を把握した。

(1) 検討方法

1) 試験路面およびその路面性状

試験に用いた舗装路面は、図-19 に示す国土技術政策総合研究所試験走路の22路面を対象とした。主な路面性状を表-14 に示す。舗装の種類は、密粒度、開粒度、SMA、連続鉄筋コンクリート、低燃費の各種舗装で、骨材粒径や路面劣化状態も様々である。

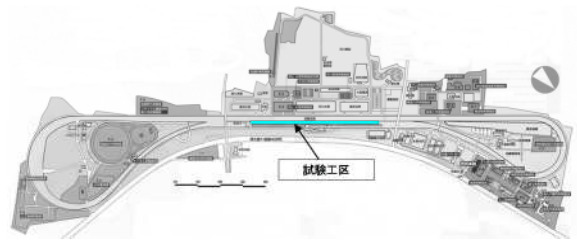


図-19 試験工区の概要

表-14 試験工区の概要

No.	混合物名	工区延長 (m)	MPD (mm)	SMTD (mm)	サンドパッチング (平均厚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

2) タイヤ/路面接地応力分布の測定

タイヤ/路面間の接地応力分布の測定は、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・時間接地させた(写真-8)。測定条件を表-15に示す。感圧紙は測定圧力範囲が決まっており、複数の感圧紙を用いた。接地試験後、感圧紙を専用スキャナで読み込み、圧力解析を行い接地応力ごとの設置面積を算出した。



(上: すべり測定車第5輪、下: 測定風景近接)

写真-8 タイヤ/路面接地応力分布の測定

表-15 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/工区

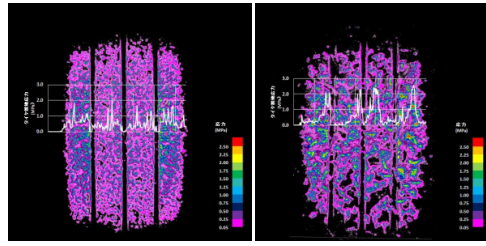
3) 転がり抵抗の評価法に向けた検討

接地応力ごとの面積より、応力分布の特性や路面性状との関係等を整理した。また、転がり抵抗の評価方法として、ネガティブテクスチャ・ポジティブテクスチャ分類等の検討を行った。

(2) 検討結果

1) 試験路面のタイヤ/路面接地応力分布

得られたタイヤ/路面間の接地応力分布コンター図の一例を図-20に示す。



(左: 低燃費舗装、右: 排水性舗装(13))

図-20 タイヤ/路面接地応力分布コンター図

図より、この2路面の接地応力分布は明らかな差異があり、5工区は接地面積が広く・応力範囲が狭い、20工区は接地面積が狭く・応力範囲が広いことが分かる。これは、前者がネガティブテクスチャ路面、後者はポジティブテクスチャ路面を示しているとして視覚的に分類できる。

この接地面積について、面積順に整理した結果を図-21、接地応力ごとの面積の推移を図-22に示す。

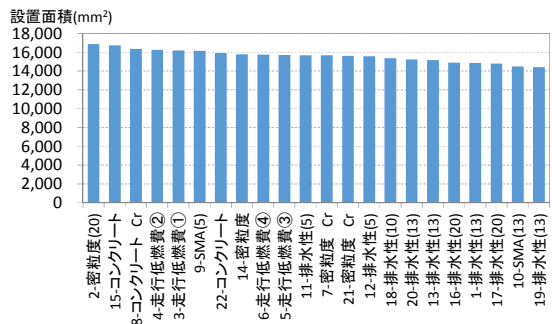


図-21 各試験工区の接地面積

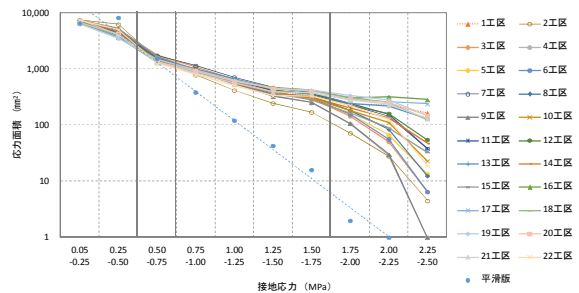


図-22 各試験工区の接地応力ごとの面積推移

図-21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、工区間の差はそれほど小さくなく、このままテクスチャの分類をするには困難である。そこで、接地応力毎の面積推移(図-22)では、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。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、1.75MPa 以上)の面積割合の関係を整理したところ、図-23 のとおり高い相関が認められた。

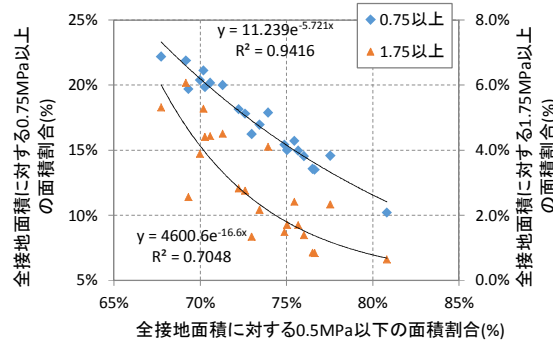


図-23 接地応力0.5MPa以下と0.75MPa・1.75MPa以上の面積割合の関係

このことから、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、全体の接地応力分布の傾向を定量的に把握できる可能性があると考えられる。この高い接地応力として1.75MPa 以上の面積割合を用い、順に並べた結果を図-24 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から、この図の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かった。

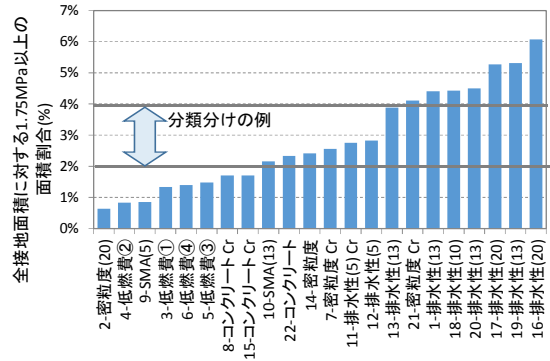


図-24 高接地応力の面積割合の関係

2) 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/路面接地応力分布と既存のテクスチャ評価指標の相関関係を整理した結果を表-16 に示す。

表-16 既存のテクスチャ評価指標との関係

評価項目	相関係数			
	0.05-0.5	0.50-0.75	0.75-1.75	1.75以上
MPD*	-0.91	-0.49	0.59	0.88
SMTD*	-0.85	-0.41	0.51	0.78
サンドパッチ*	-0.91	-0.42	0.63	0.85
BPN	0.50	0.31	-0.48	-0.54

*) データを対数変換し直線近似して求めた相関係数

タイヤ/路面接地応力分布(1.75MPa 以上)は、きめ深さ指標のMPD、SMTD、サンドパッチと高い相関がある。

これより、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ると考えられる。さらに、図-20および図-24 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。

なお、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。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、今後さらにデータを増やして確認していく必要がある。

3) 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のまとめ

・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よそ分類できる。

・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、高い相関が認められた。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、全体の設置応力分布の特性を把握することが出来る可能性がある。

・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。

・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、サンドパッチと高い相関関係がある。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。

以上より、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ことが分かった。

3. 舗装工法等の LCCO₂ 評価技術の提案

3.1 低炭素舗装技術の LCCO₂ 評価

3.1.1 LCCO₂ の試算 (セミホット、常温合材、表面処理、セメント安定処理)

(1) 試算方法

低炭素舗装技術 (セミホット、常温合材、表面処理、セメント安定処理) について、通常の舗装技術 (比較技術) とのライフサイクル CO₂ 排出量の比較を行った。また、低炭素舗装技術のライフサイクルスパン (舗設した後、舗装を供用し、再施工する期間。耐久性や寿命) に着目し、ライフサイクルスパンの変化がライフサイクル CO₂ に与える影響を試算した。なお、本試算においては、舗装性能評価法別冊に記載している原単位を用いて行った。

試算の対象とした低炭素舗装技術および比較技術を表-16、舗装断面を表-17~20 に示す。

表-16 ライフサイクル CO₂ 試算ケース

ケース	工法 (①:低炭素舗装技術、②:比較技術)
Case A	①セミホット(60℃低減、砂乾燥なし) ②比較:密粒度アスファルト混合物(13)
Case B	①常温合材(非加熱、特殊添加剤使用、再生骨材) ②比較:密粒度アスファルト混合物(13)
Case C	①表面処理(非加熱、特殊乳剤使用) ②比較:マイクロサーフェッシング
Case D	①セメント安定処理工法(中央混合) ②アスファルト安定処理工法(加熱混合)

表-17 Case A の舗装断面

種類	舗装断面図(軽交通)		
	舗装構成	舗装材料	h(cm)
セミホット (60℃低減、砂乾燥なし)	表面	セミホットアスファルト(60℃低減、砂乾燥なし)	5.0
	基層	密粒度アスファルト(20)	5.0
	上層路盤	粗粒度調整砂石	
	下層路盤	フラックツラ	
	路床		
密粒舗装 (密粒度アスファルト(13))	表面	密粒度アスファルト(13)	5.0
	基層	密粒度アスファルト(20)	
	上層路盤	粗粒度調整砂石	
	下層路盤	フラックツラ	
	路床		

表-18 Case B の舗装断面

種類	舗装断面図(軽交通)		
	舗装構成	舗装材料	h(cm)
常温合材 (非加熱、特殊乳剤、再生骨材)	表面	常温合材(非加熱、特殊乳剤使用、再生骨材)	5.0
	基層	密粒度アスファルト(20)	
	上層路盤	粗粒度調整砂石	
	下層路盤	フラックツラ	
	路床		
密粒舗装 (密粒度アスファルト(13))	表面	密粒度アスファルト(13)	5.0
	基層	密粒度アスファルト(20)	
	上層路盤	粗粒度調整砂石	
	下層路盤	フラックツラ	
	路床		

表-19 Case C の舗装断面

種類	舗装断面図(軽交通)		
	舗装構成	舗装材料	h(cm)
表面処理 (非加熱、特殊乳剤使用)	表面	表面処理(非加熱、特殊乳剤)	1.0
	基層	密粒度アスファルト(13)	
	上層路盤	粗粒度調整砂石	
	下層路盤	フラックツラ	
	路床		
マイクロサーフェッシング工法	表面	マイクロサーフェッシング混合物	0.8
	基層	密粒度アスファルト(13)	
	上層路盤	粗粒度調整砂石	
	下層路盤	フラックツラ	
	路床		

表-20 Case D の舗装断面

種類	舗装断面図(重交通)		
	舗装構成	舗装材料	h(cm)
セメント安定処理路盤 (中央混合)	表面	再生密粒度アスファルト(13)改質Ⅱ型	5.0
	基層	密粒度アスファルト(20)	5.0
	上層路盤	セメント安定処理	15.0
	下層路盤	粗粒度調整砂石	15.0
	路床	フラックツラ	35.0
As安定処理路盤 (As安定処理路盤材料)	表面	再生密粒度アスファルト(13)改質Ⅱ型	5.0
	基層	密粒度アスファルト(20)	5.0
	上層路盤	As安定処理	10.0
	下層路盤	粗粒度調整砂石	15.0
	路床	フラックツラ	35.0

これら舗装技術のライフサイクルの設定は、Case A および B では、N6 断面に新設後、10 年後に表層のみ切削オーバーレイ (以後、切削 OL) し、新設 20 年後に全層打ち換えを行うこととした。Case C は、Case A・B の切削 OL の中間年 (5 年後) に表面処理工法を行う。Case D は、N6 断面に新設後、10 年後に路盤打ち換え、新設 20 年後に全層打ち換えを行う設定とした。

ライフサイクル CO₂ の試算に用いた主な材料の CO₂ 排出量原単位、輸送距離、運搬経路を表-21 に示す。その他、舗装工事等に用いる材料等の CO₂ 排出量原単位およびライフサイクル CO₂ の試算は、日本道路協会「舗装性能評価法別冊-必要に応じて求める性能評価編」¹⁴⁾ に準じて積み上げ法によって行った。また、舗装工事に用いる燃料等の数量や日施工量等に

については、国土交通省土木工事積算基準（平成 24 年版）¹⁴⁾に準拠して算出した。

表-21 材料の CO₂ 排出量原単位等
(主に舗装性能評価法別冊¹³⁾に準拠)

分類	素材名	投入単位	原単位 (kg-CO ₂ /単位)	CO ₂ 原単位換算係数	運搬距離 (km)	運搬経路	原材運搬時 CO ₂ 算定方法
舗装材	ストレートアスファルト	t	248	性能評価法別冊表1.9.2	240	工場→合材工場	トヨタ法
	ポリマー改質アスファルトII型	t	474	#	240	#	#
	ポリマー改質アスファルトH型	t	612	#	240	#	#
	アスファルト乳剤MR2	L	0.183	#	100	#	#
	改質アスファルト乳剤	L	0.277	#	240	工場→現場	#
	中温化剤	t	390	2009.12 土木学会論文集p.72	240	工場→合材工場	#
	セメント	t	798.1	性能評価法別冊	240	工場→合材工場	#
	単粒度砕石	t	5.39	性能評価法別冊表1.9.2	20	工場→合材工場	#
	砂	t	0.55	#	20	工場→合材工場	#
	スクリーニングス	t	5.39	#	20	工場→合材工場	#
	フィルター	t	1.21	#	20	工場→合材工場	#
	再生骨材	t	2.08	#	20	工場→合材工場	#
	水	t	0.1	2008.12 舗装工学論文集p.72	-	基地→工場	#
	燃料	軽油	L	2.62	性能評価法別冊表1.9.4	-	合材工場
A重油		L	2.71	#	-	合材工場	#
電気		kWh	0.555	#	-	合材工場	#

(2) 低炭素舗装技術の CO₂ 排出量の試算結果
各低炭素技術のライフサイクル CO₂ 排出量を図-25 に示す。

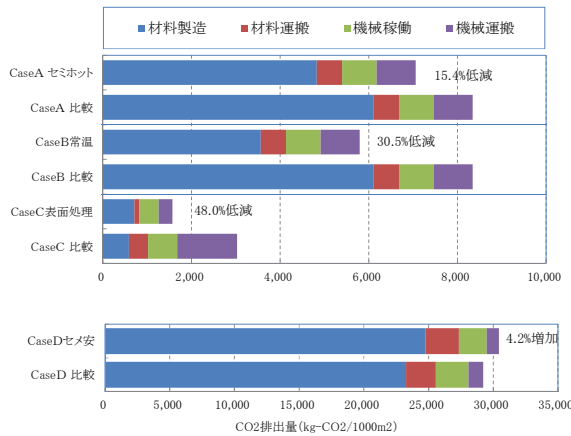


図-25 ライフサイクル CO₂ の算出結果

Case A において、低炭素舗装技術であるセミホットは、通常技術である密粒度アスファルト混合物 (13) に比較して、CO₂ 排出量を 15.4% 低減した。また、Case B では、常温合材を用いた舗装は、密粒度アスファルト混合物 (13) に比較して、CO₂ 排出量は 30.5% 低減、Case C では、開発した表面処理工法は比較工法より 48.0% 低減となった。一方、Case D のセメント安定処理については、アスファルト安定処理工法と比較して CO₂ 排出量は 4.2% 増となった。

これは、セメントの CO₂ 排出量原単位が他の材料に比べて大きいこと、セメント安定処理の等値換算係数がアスファルト安定処理（加熱混合）より低い

ことから舗装厚が厚くなった（材料の数量が多くなった）ことに起因していると考えられる。ただし、試算に用いたセメントはポルトランドセメントを用いており、CO₂ 原単位の小さいセメントを用いればライフサイクル CO₂ 排出量も少なくなる。

次に、ライフサイクルスパンを変化させたときの比較技術とのライフサイクル CO₂ 排出量を図-26 に示す。

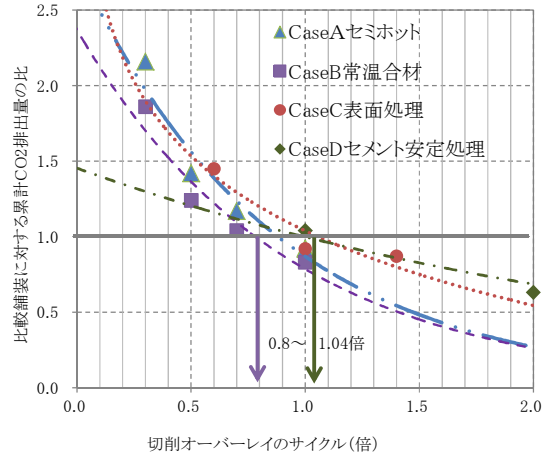


図-26 ライフサイクルスパンと CO₂ 排出量の関係

セミホット、常温舗装、表面処理は、比較技術に比べライフサイクルスパン（耐久性）は、0.92、0.83、0.92 倍になっても CO₂ 排出量削減効果が期待できる。また、セメント安定処理は、比較技術に比べ CO₂ が若干多くなり、ライフサイクルスパンは 1.04 倍に延命させる必要がある。一方でセメント安定処理のコストは削減できることもあり、効果はほぼ同程度と言える。

(3) まとめ

本検討結果をまとめると、以下のとおりである。

- ① セミホット、常温舗装、表面処理は、比較技術に比べライフサイクルスパン（寿命）が 0.92、0.83、0.92 倍になっても CO₂ 排出量削減効果が期待できる、
- ② セメント安定処理は、比較技術に比べ CO₂ が若干多くなる。これは、層厚が厚いこと、材料の CO₂ 原単位が大きいことに起因すると考えられる。ライフサイクルスパンは 1.04 倍に延命させる必要があるが、コストは低減できる可能性もあることから効果はほぼ同程度と言える。

3.1.1 LCCO₂ の試算（中温化、コンクリート）

低炭素舗装技術である中温化舗装技術について、

通常の舗装技術（比較技術）とのCO₂及びLCCO₂排出量の比較を行った。また、アスファルト舗装とコンクリート舗装のライフサイクルスパン（寿命）に着目し、ライフサイクルスパンの変化がLCCO₂に与える影響を試算した。

(1) 試算方法

ライフサイクルCO₂の試算ケースを表-22、舗装断面を表-23 および表-24 に示す。

表-22 ライフサイクルCO₂試算ケース

ケース	工 法
Case 1	①比較：再生密粒度舗装（通常温度）
	②中温化技術：再生密粒度舗装（30℃低減）
Case 2	①比較：排水性舗装（通常温度）
	②中温化技術：排水性舗装（50℃低減）
Case 3	①アスファルト舗装
	②コンクリート舗装

表-23 Case 2 の舗装断面（Case 1 も同様）

種類	舗装断面図（重交通）			
①排水性舗装	舗装構成	舗装材料	h(cm)	切削 既設舗装
	表層	ポーリアクシ(13) (ε, 17ε-改質H型)	5.0	
	基層	粗粒度アコシ(20)	5.0	
	上層路盤	アコシ安定処理 粒度調整砕石	10.0	
	下層路盤	アコシ砕石	10.0	
路床			路床	
②中温化排水性舗装 (50℃低減)	舗装構成	舗装材料	h(cm)	切削 既設舗装
	表層	ポーリアクシ(13) (ε, 17ε-改質H型, 50℃低減)	5.0	
	基層	粗粒度アコシ(20)	5.0	
	上層路盤	アコシ安定処理 粒度調整砕石	10.0	
	下層路盤	アコシ砕石	10.0	
路床			路床	

表-24 Case 3 の舗装断面

種類	舗装断面図（重交通）			
①アスファルト舗装	舗装構成	舗装材料	h(cm)	打替 t=25cm 既設舗装
	表層	密粒度アコシ(13)	5.0	
	基層	粗粒度アコシ(20)	5.0	
	上層路盤	アコシ安定処理 粒度調整砕石	10.0	
	下層路盤	アコシ砕石	10.0	
路床			路床	
②コンクリート舗装	舗装構成	舗装材料	h(cm)	打替 t=32cm 既設舗装
	表層	普通コンクリート	28.0	
	As中間層	再生密粒度アコシ(13)	4.0	
	上層路盤	粗粒度調整砕石	10.0	
	下層路盤	アコシ砕石	25.0	
路床			路床	

Case 1 および 2 では表層5cmに新設後、5～10年毎の表層を切削オーバーレイ（以後、切削OL）を行う条件で中温化舗装技術を適用した場合について試算した。Case 3 では、アスファルト舗装は、新設後10年毎に路盤打換え、コンクリート舗装では路盤打換えのサイクルを20年～40年と変化させ、新設20年後に全層打換えを行う条件でライフサイクルスパンがライフサイクルCO₂に与える影響について試算した。

ライフサイクルCO₂の試算に用いた主な材料のCO₂排出量原単位を表-25 に示す。その他、舗装工事等に用いる材料等のCO₂排出量原単位およびライフサ

イクルCO₂の試算は、日本道路協会「舗装の環境負荷低減に関する算定ガイドブック」¹⁵⁾に準じて行った。また、舗装工事に用いる燃料等の数量や日施工量等については、国土交通省土木工事積算基準（平成24年版）¹⁴⁾に準拠して算出した。

表-25 材料のCO₂排出量原単位等

分類	素材名	投入単位	原単位 (kg-CO ₂ /単位)	CO ₂ 原単位根拠
素材	ストレートアスファルト	t	107.56	【国総研原単位2005c】
	ポリマー改質アスファルトH型	t	670.40	舗装の環境負荷低減に関する算定ガイドブック
	中温化剤	t	287.64	【国総研原単位2005c】
	普通ポルトランドセメント	t	888.25	【国総研原単位2005c】
	乳剤(PK-3.4,PKR-T)	L	126.51	舗装の環境負荷低減に関する算定ガイドブック
	砕石	t	7.98	【国総研原単位2005c】
	砂	t	11.54	【国総研原単位2005c】
	スクリーニングス	t	7.98	舗装の環境負荷低減に関する算定ガイドブック
	フィルター	t	5.41	【国総研原単位2005c】
	再生骨材	t	2.23	舗装の環境負荷低減に関する算定ガイドブック
	水	t	0.095	【国総研原単位2005c】
	燃料 電気	軽油	L	2.95
A重油		L	2.91	【国総研原単位2005c】
電気		kWh	0.464	【国総研原単位2005c】

(2) 低炭素舗装技術のCO₂排出量の試算結果

各低炭素技術のCO₂排出量を図-5 に示す。

Case 1 において、再生密粒度舗装では、中温化技術を適用し、製造温度を30℃低減することで通常技術に比較して、CO₂排出量が3.9%低減となった。Case 2 においては、排水性舗装に中温化技術を適用し、製造温度を50℃低減することで通常技術に比較して、CO₂排出量が5.7%低減される試算結果となった。

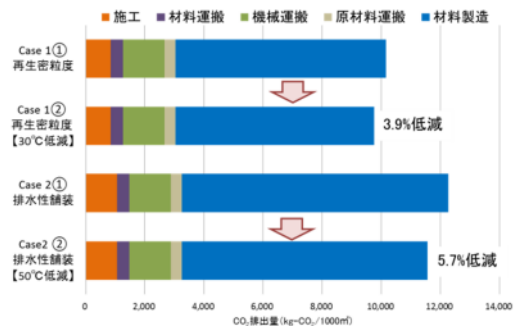


図-27 CO₂の算出結果

次にアスファルト舗装とコンクリート舗装のライフサイクルスパンによるLCCO₂排出量を図-6 に示す。コンクリート舗装では打替えサイクルを30年とした場合、アスファルト舗装と同程度、40年とした

場合にはアスファルト舗装より LCCO₂ が低減する結果となった。

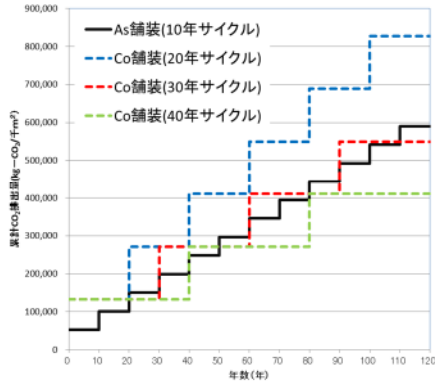


図-28 ライフサイクルスパンによる LCCO₂ (Case 3)

3. 2 低燃費舗装の LCCO₂ 評価技術の提案

低燃費舗装の CO₂ 排出量削減効果の評価方法として、舗装のライフサイクル CO₂ (LCCO₂) 評価法に自動車からの排出される CO₂ 排出量を考慮した手法として、拡張ライフサイクル CO₂ 評価 (ELC-CO₂)¹⁶⁾ に着目した。具体的には、低燃費舗装の材料製造から輸送、施工、再生利用するまでのライフサイクル CO₂ を算出し、低燃費舗装による自動車の CO₂ 低減率に関する実測データを用いることによって低燃費舗装を一般国道に適用した際の自動車から排出される CO₂ 排出量の低減効果を定量的に試算し、この拡張ライフサイクル CO₂ 評価の適用性を確認した。

3. 2.1 研究方法

まず、道路種別による自動車からの CO₂ 排出量を算出するにあたって、自動車の CO₂ 排出量原単位は、道路環境アセスメントに用いる 2 車種別の CO₂ 排出係数式を用いた (表-26)。算出に用いた平均旅行速度、交通量、平均車線数は、道路交通センサスより茨城県を抽出し、道路種別として高規格幹線道路、一般国道、主要地方道、一般都道府県道に整理した (表-27)。自動車から排出される CO₂ 排出量は、この排出係数に交通量、距離を乗ずることによって算出することができる。また、平均車線数により、道路種別毎の 1 日あたり・1 車線あたりの自動車からの CO₂ 排出量を算出した。

表-26 自動車排出係数式

年度	車種区分	CO ₂ 排出係数式(単位:g-CO ₂ /km)
H22 (2010)	小型車類	EF = 1501.20185/v - 2.40935×v + 0.02115×v ² + 174.47635
	大型車類	EF = 908.52069/v - 23.49899×v + 0.18396×v ² + 1364.81344

ここに、EF: CO₂排出係数(g-CO₂/km・台)、v: 平均走行速度(km/h)

表-27 1日あたり・1車線あたり交通量(茨城県)

道路種別	昼間12時間平均旅行速度(km/h)	24時間平均交通量(台/日)		平均車線数(加重平均)
		小型車	大型車	
高規格幹線道路	81.3	21,985	8,359	4.63
一般国道	37.2	13,797	3,651	2.85
主要地方道	37.5	7,128	1,124	2.34
一般都道府県道	36.8	4,686	636	2.14

次に、低燃費舗装による CO₂ の削減量を試算した。アスファルト舗装の材料製造、運搬、施工、廃棄 (路盤の打換え) のライフサイクル CO₂ は、道路協会「舗装の環境負荷低減に関する算定ガイドブック」に準拠して算出した。また、低燃費舗装により、自動車の CO₂ 排出量の削減量は、前述の排出係数に CO₂ 排出量改善率を乗ずることによって算出した。この低燃費舗装による自動車の燃費改善率は、試験走路における走行実験による実測によって得られたデータを用いた。過年度の実測では、走行速度を 20, 40, 60 および 80km/h で走行した結果、排水性舗装(13)に比べて、低燃費舗装(5)は 1.5~3.2%、低燃費型排水性(5)は 1.0~3.4%の CO₂ 低減効果があった。これより、低燃費舗装による CO₂ 排出量改善率は平均の 2%とし、参考として低減効果 1%も試算した。

3. 2.2 研究結果

本件等では茨城県を抽出し、高規格幹線道路、一般国道、主要地方道、一般都道府県道の自動車からの CO₂ 排出量と、アスファルト舗装のライフサイクル CO₂ を図-29 に示す。自動車から排出される CO₂ 量は、アスファルト舗装の LCCO₂ に比べて顕著に多いことが分かる。これは、高規格幹線道路や一般国道など交通量が多いほど単位延長あたりの自動車からの CO₂ 排出量が多くなることを示しており、低燃費舗装を適用した際の効果は高くなることが推察される。

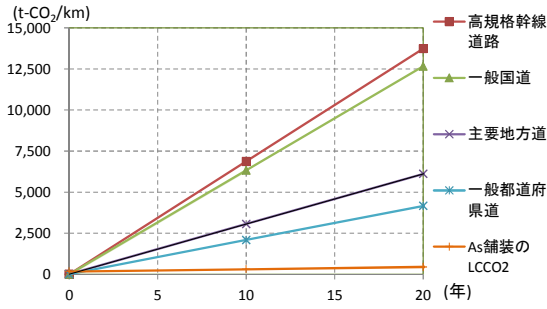


図-29 自動車からのCO₂排出量とアスファルト舗装のLCCO₂

この一般国道を対象として、低燃費舗装を1km適用した際のCO₂排出量を試算した結果を図-30に示す。ここで、図中の凡例の「現状のまま」は、低燃費舗装を施工せずに、自動車からのCO₂排出量の低減もないままのライフサイクルCO₂の試算結果である。また、凡例の「低燃費1.0%」および「低燃費2.0%」は、低燃費舗装のライフサイクルCO₂から、低燃費舗装による自動車からのCO₂排出量低減分を差し引いた結果である。この図より、低燃費舗装のCO₂改善効果が2%の場合、通常のアスファルト舗装のライフサイクルCO₂（現状のまま）に対して、約70%のCO₂排出量を削減する効果があることが定量的に示すことができた。また低減効果が1%であっても、約30%のCO₂削減効果があった。これにより、低燃費舗装を一般国道等に適用することによって、CO₂削減効果があることが定量的に示すことが出来た。

以上より、拡張ライフサイクルCO₂評価(ELC-CO₂)手法は、低燃費舗装の建設および打換え等に係るCO₂排出量および自動車からのCO₂排出量低減効果を含めて定量的に評価することができる手法であることがわかった。

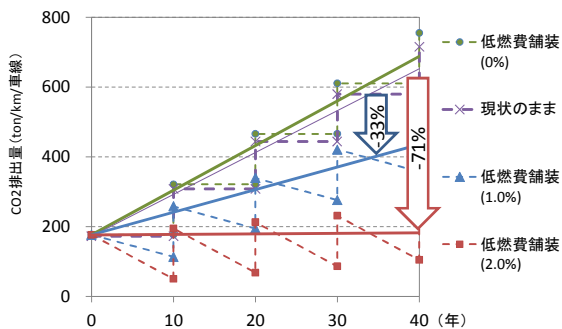


図-30 低燃費舗装を適用した際の、自動車からのCO₂排出量低減分を考慮に入れたLCCO₂

3.2.3 低燃費舗装のCO₂排出量削減効果の評価に関する検討のまとめ

(1) 自動車からのCO₂排出量は、アスファルト舗装のLCCO₂に比べて顕著に多く、高規格幹線道路や一般国道など交通量が多いほど1kmあたりの自動車からのCO₂排出量が多くなる。これら道路に低燃費舗装を適用した際の効果は高くなると考えられる。

(2) 低燃費舗装によるCO₂改善効果が2%の場合、通常のアスファルト舗装（何も対策しなかった場合）に比べて約70%のCO₂削減効果があった。また低減効果が1%であっても約30%のCO₂削減効果があったことから、低燃費舗装を一般国道等に適用することによってCO₂削減効果があることが定量的に示した。

以上より、低燃費舗装のライフサイクルCO₂に自動車からの排出されるCO₂排出量を組み入れた、拡張ライフサイクルCO₂評価(ELC-CO₂)を行うことによって、低燃費舗装のCO₂削減効果を定量的に示すことが出来る手法であることが明らかになった。

4. まとめ

本研究の結果をまとめると以下の通りである。

- 1) 低炭素化舗装工法の改良として、チップシール工法の高耐久化技術を開発した。
- 2) 低燃費舗装の開発として、骨材の配合及び施工方法を工夫することによって、転がり抵抗の少ない舗装（低燃費舗装）技術を開発することができた。
- 3) 既存技術のライフサイクルCO₂分析による定量評価では、様々な低炭素舗装技術のライフサイクルCO₂と寿命（ライフサイクルスパン）の関係を明らかにした。
- 4) 低燃費舗装の自動車のCO₂改善効果を検討するには、拡張ライフサイクルCO₂評価手法(EL-CO₂)の適用により定量的に評価できることを明らかにした。

特に、本研究で開発した低燃費舗装は、今後の低炭素社会の実現に向けた新しい技術であると考えられる。タイヤ/路面間の転がり抵抗は、タイヤ（または路面）の温度、タイヤ（または自動車）の大きさ、自動車の走行速度等によって変化すると考えられ、またそれによって乗り心地やすべり性状の関連性など、そのメカニズムは複雑であることから、今後も路面性状と転がり抵抗の関係解明に向けた検討が必要である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：環境に配慮した舗装技術に関するガイドブック、2009.6
- 2) G. W. Taylor、et al.: Effect of Pavement Structure on Vehicle Fuel Consumption - Phase III、National Research Council Canada、 Canada、2006
- 3) D. Thierrt: 道路産業におけるバイオバインダ乳剤の使用、あすふあるとにゆうざい、184号、pp.10-14、2011.8
- 4) 守安弘周、関口和也、宮崎慎也、傳田喜八郎: バイオマス燃料を活用したアスファルト混合物の製造、舗装 45 -11、p.17 -22、2010.11
- 5) NAPA: 2nd International Warm-Mix Asphalt Conference Proceedings、2011.10
- 6) 日本道路建設業協会: 環境保全を目指した中温化(低炭素)アスファルト舗装-中温化技術による加熱アスファルト混合物でのCO₂削減-、2010
- 7) 酒井秀男: 改訂版タイヤ工学入門、グランプリ出版、2002
- 8) PIARC: Optimization of Surface Characteristics、PIARC Technical Committee on Surface Characteristics、Report of VXIIIth World Road Congress、Brussels、Belgium、1987.
- 9) 日本規格協会: JIS D 1015 自動車-惰行試験方法、1993
- 10) 日本規格協会: JIS D 1012 自動車-燃料消費率試験方法、2005
- 11) 茄子川捷久、汐川満則、宮下義孝: 自動車の走行性能と試験法、山海堂、2002.3
- 12) 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
- 13) 日本道路協会: 舗装性能評価法別冊-必要に応じて求める性能評価編-、2008
- 14) 国土交通省: 土木工事積算基準(平成24年版)、2012.
- 15) 日本道路協会: 舗装の環境負荷低減に関する算定ガイドブック- CO₂排出量低減値および最大流出量比の算定-、2014
- 16) 中村英樹、加藤博和、丸田浩史、二村達: 都市間高速道路の横断面構成の相違によるCO₂排出量のライフサイクル評価、環境システム研究、Vol.26、1998.10

7.2 A STUDAY ON DEVELOPMENT AND EVALUATION OF PAVEMENT TECHNOLOGY FOR LOW-CARBON SOCIETY(1)

Grants for operating expenses General account
FY2011-2015
Pavement Research Team
Kazuyuki KUBO, Masaru TERADA,
Atsushi KAWAKAMI, Kazunari Hirakawa

【Abstract】

For realization of the low carbon society, some pavement technologies for reducing CO₂ emissions are being developed. The objectives of this study are the development and evaluation of low CO₂ emission pavement technologies for actual application to the pavement works. In the development of low CO₂ emission pavement, 1) Improvement of conventional pavement technologies for low carbon technology, and 2) Development of low mileage pavement were conducted. On the other hands, in the evaluation of low CO₂ emission pavement, 3) Life-cycle CO₂ evaluation of conventional pavement as a low CO₂ emission technology, and 4) Life-cycle CO₂ evaluation of low mileage pavement including the effect of reducing the CO₂ emission from vehicle were conducted.

The results of these experiments are as follows; 1) High durability chip seal pavement method was developed. 2) Low mileage pavement technology was developed by improvement of aggregate distribution and compaction method in construction. 3) Relationship between life-cycle CO₂ and lifecycle span of some low CO₂ emission pavement technologies were analyzed. 4) It was revealed that extended life-cycle CO₂ analysis was applicable as quantitative evaluation of effect for low mileage pavement.

【Key words】

Low CO₂ emission pavement, Low mileage pavement, Tire / pavement rolling resistance, Warm mix asphalt , Life-cycle CO₂ analysis