

7.2 低炭素社会を実現する舗装技術の開発および評価手法に関する研究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

【要旨】

低炭素社会の早期実現に向け、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、舗装の低炭素化技術の開発、およびそれらの低炭素化技術の評価方法の開発を行うことを目的とする。

平成 24 年度は、低炭素舗装技術の現状を体系的に整理するとともに、中温化技術について海外における研究開発状況やその評価手法等の現状を取りまとめた。また、新たな低炭素舗装技術である低燃費舗装について、自動車等から排出される CO₂ を考慮に入れたライフサイクル CO₂ 評価を行った。その結果、低燃費舗装は重交通路線に適用すると効果が高いことや舗装のライフサイクル CO₂ は減る可能性があることが分かった。

キーワード：低炭素舗装、中温化技術、評価方法、ライフサイクル CO₂

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⁾では、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 年に発行されているが、発行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。これら低炭素舗装技術は、低炭素社会の実現に向けて、更なる CO₂ 排出量低減を目指した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明らかにすることが必要である。

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、2. 舗装材料・舗装工法等の LCCO₂ 評価技術の提案を目的としている。本年度は、低炭素舗装技術の現状として、現在研究開発中の技術も含め体系的に整理するとともに、近年わが国でも低炭素技術として注目されている中温化技術等について、海外における研究開発状況やその評価手法等の現状と取りまとめた。また、新たな低炭素舗装技術である低燃費舗装について、自動車等から排出される CO₂ を考慮に入れたライフサイクル CO₂ 評価を行った。

2. 研究方法

2.1 低炭素舗装技術の現状調査

低炭素舗装技術の現状調査にあたっては、まず初

めに、現在、低炭素技術として考えられる舗装技術を整理した。次に、低炭素舗装技術として近年注目されている中温化技術に関し、海外における中温化技術の現状として、中温化技術の種類（分類）や実績等を把握すると共に、中温化技術の性能評価方法を取りまとめた。

(1) 低炭素舗装技術の整理

低炭素舗装技術の整理にあたっては、「環境に配慮した舗装技術に関するガイドブック」¹⁾の CO₂ 排出抑制機能を有する舗装技術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、同年次講演会講演集、舗装誌、道路建設誌、あすふあるとにゆうざい誌等を参照した。

(2) 海外における中温化技術の現状

中温化技術の海外における開発状況および性能評価項目の現状にあたっては、海外における中温化技術の種類（分類）や実績等を把握すると共に、中温化技術の性能評価の現状を把握した。参照した海外文献は、全米アスファルト協会の技術図書²⁾や中温化技術に関する国際会論文集³⁾、インターネット WEB (asphaltpavement.org, warmmixasphalt.com, eapa.org, trb.org, gisbau.de 等) である。

2.2 舗装のライフサイクル CO₂ 評価に関する検討

近年、低炭素舗装技術として、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舗装技術（以下、低燃費舗装）に関する

取り組み^{4), 5)}が行われている。低燃費舗装のメカニズムは、舗装構造の剛性、平坦性、路面テクスチャなど考えられるが、まだ新しい分野であるため影響要因等詳細に明らかになっていないとともに、自動車から排出されるCO₂と舗装のCO₂排出量の関係等、まだ検討事例も少ないのが現状である。

本研究では、自動車から排出されるCO₂について道路種別の傾向を把握するとともに、低燃費舗装の適用可能性を検討した。また、低燃費舗装による自動車由来のCO₂排出量低減効果と、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を定量比較し、低燃費舗装のCO₂削減効果を試算した。

(1) 低燃費舗装のCO₂改善効果の試算

まず、道路種別による自動車からのCO₂排出量を算出した。自動車のCO₂排出量原単位は、表-1に示す2車種別のCO₂排出係数式⁶⁾を用いた。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⁷⁾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-2)。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出来る。平均車線数により、道路種別毎の1日・1車線あたりの自動車からのCO₂排出量を算出した。次に、低燃費舗装による自動車の燃費が改善した際のCO₂排出量を試算した。表-1のCO₂排出係数と燃費は比例しているため、この排出係数に燃費改善率を乗ずることによって、低燃費舗装のCO₂排出量を算出した。

舗装による自動車の燃費改善率は、カナダにおいてコンクリート舗装(以下、Co舗装)はアスファルト舗装(以下、As舗装)に比べて大型車で0.8~6.9%上回ると報告⁴⁾があり、日本においてもAs舗装はCo舗装に比べて大型車で転がり抵抗が10.7%、燃費は都市間モードに換算し2.5~2.6%劣る報告⁵⁾がある。As舗装については知見が少ないが、転がり抵抗の少ないエコタイヤを装着した普通自動車においてAs舗装上を走行した結果、ノーマルタイヤに比べて平均6%のCO₂排出量が減少した報告⁶⁾がある。このことから、As舗装も転がり抵抗を少なくすることによって低燃費舗装になる可能性もあると考えられる。これらを考慮し、低燃費舗装による燃費改善率を小型車、大型車共に1%、3%、5%とした。

表-1 自動車からのCO₂排出係数式⁶⁾

年度	車種区分	CO ₂ 排出係数式(単位:g-CO ₂ /km)
H22 (2010)	小型車種	$EF = 1427.33/v - 2.8375 \times v + 0.02360 \times v^2 + 191.762$
	大型車種	$EF = 50.2788/v - 27.312 \times v + 0.20876 \times v^2 + 1592.69$

ここに、EF:CO₂排出係数(g-CO₂/km³・台)、v:平均走行速度(km/h)

表-2 道路種別の平均旅行速度、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

(2) 舗装のライフサイクルCO₂との比較

2.2(1)で求めた自動車由来のCO₂排出量と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の定量比較を行った。比較対象とする舗装は、低燃費舗装として提案されているCo舗装、および平坦性等により燃費がよくなることを想定しAs舗装も対象とした。ライフサイクルCO₂の試算は、過去の試算結果⁸⁾を用い、Co舗装は20年、As舗装は10年で全層打換えを行う。舗装構成はN₀構造とし、施工面積は1km、幅員は3.5mとして試算した。

3. 研究結果

3.1 低炭素舗装技術の現状調査

(1) 低炭素舗装技術の種類の整理

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結果を表-3に示す。低燃費舗装技術やバイオ技術については、新たに追加した技術である。低燃費舗装は、自動車のタイヤの転がり抵抗が低くなることによって、燃費が良くなり自動車から排出されるCO₂が少なくなるものである。カナダおよび日本で舗装の種類を変えて実験を行い、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の報告がある^{4), 5)}。

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^{9), 10)}やバイオマス燃料¹¹⁾を用いるもので、カーボンニュートラルにより素材のCO₂排出量はゼロとなる。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90%(カロリー比)使用した場合、通常の燃料(A重油)を用いた場合と比較して約80%削減されるという報告¹¹⁾がある。

7.2 低炭素社会を実現する舗装技術の開発および評価手法に関する研究①

表-3 低炭素舗装技術の整理

技術の種類		具体の技術
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
	常温製造技術	チップシール
		マイクロサーフェシング
	リサイクル技術	プラント再生舗装工法
		路上表層再生工法
路上路盤再生工法		
長寿命化技術	コンポジット舗装	
	改質アスファルトの適用	
材料技術	フルデプス舗装(※)	
	コンクリート舗装(※)	
	バイオバインダ(※)	
製造設備技術	バイオ燃料(※)	
	バーナの燃費向上	
施工機械技術	ドライヤ内の羽根の改良等	
	エンジン回転数制御技術	低燃費型建設機械
施工の効率化技術	ハイブリッド建設機械(※)	
	電力駆動技術	バッテリー式建設機械
	3Dマシンコントロール	

※: 環境ガイドブックから新たに追加した技術

(2) 中温化技術の海外における開発状況および性能評価項目の現状

わが国の中温化技術の分類は、環境ガイドブック

1)において以下のとおりになっている。

- A1. 発泡剤を利用するもの
- B1. フォームド技術を利用するもの
- C1. アスファルト被膜の粘度を調整するもの

一方、道路建設業協会資料¹²⁾では以下の通りである。

- A2. 発泡系
- B2. 粘弾性調整系
- C2. 滑剤系

A1 および B1 が A2 に統合され、C2 が新たなるに分類された。環境ガイドブックが H21 に発刊されたのに対して、道路建設業協会資料は H22 に発刊されていることから、現在はこの分類が一般的に使われている。なお、これら中温化技術の施工実績は、全国で 450 件 300 万 m² 程度（舗装厚を 5cm と仮定すると約 35 万トン出荷）となっているが、個別技術の施工実績は公表されていない。また、全国の加熱アスファルト混合物の出荷数は年間約 5 千万トンであることから、まだ中温化技術は普及途上にあるといえる。

一方、欧米では弱加熱技術も含め、以下および表-4 に示すように分類されている。

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

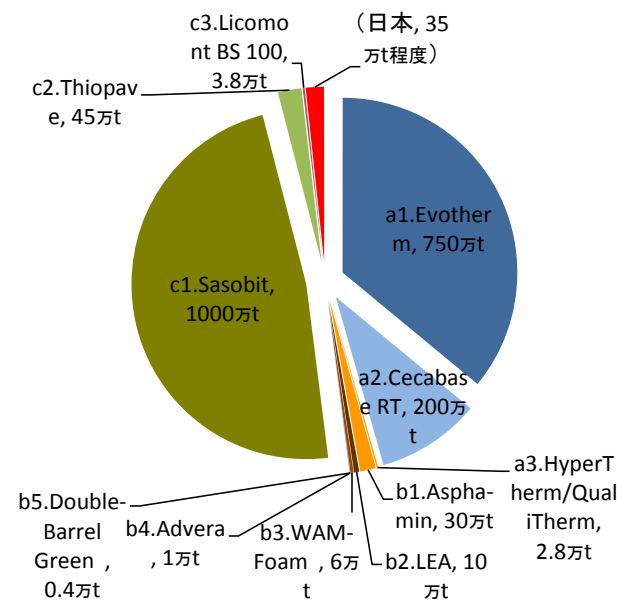
様々な技術・添加剤が開発・実用化されており、

技術数では Forming processes が多いことが分かる。

また、公表されている主な中温化技術の施工実績を図-1 に示す。2 千万トン以上の中温化混合物が製造され、特に有機系添加物の 1 技術はドイツを中心に 1 千万トンの実績があり、日本の施工実績（約 35 万トン）に比べると広く普及していることが分かる。日本においては、中温化混合物がグリーン調達にされたこととからも、今後中温化技術は普及されると予想される。なお、近年では、粘弾性調整系と滑剤系の特徴を併せ持つ添加剤やストレートアスファルトからポリマー改質アスファルトに適用する添加剤など、多岐にわたり開発されていることから、これら中温化剤の材料毎（分類毎）の評価は難しく、混合物として性能評価を行う方法や性能基準を決める必要がある。

表-4 海外の中温化技術の開発状況

技術分類	技術名	概要	実績(国)
a. Chemical Processes	Evotherm™(ET,DAT,3G)	エマルジョンで加熱骨材を被膜	フランス、カナダ、南アメリカ、アメリカ等
	Cecabase RT	水を使用しない中温化添加剤	アメリカ(NCHRP Project)
	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)
	HyperTherm/QualiTherm	水を使用しない飽和脂肪酸ベースの化学系添加剤	カナダ
b. Foaming Processes	Aspha-min	ゼオライト	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	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	フランス、ノルウェー、カナダ、イタリア等
	その他、Advera, Duple-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 Processes	Sasobit	Fischer-Tropsch ワックス	ドイツおよび世界20か国
	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	アメリカ(NCHRP Project)
	Licomont BS 100 (additive) or Subit	添加物またはバインダー(脂肪酸アミド)	ドイツ
この他、Asphaltan-B、3E LT or Ecoflex、LEADCAPなどがある			



※: 図中の数字は、文献調査で公表されている出荷数である
 ※: a=化学系添加剤、b=発泡技術、c=有機系添加物

図-1 海外の主な中温化技術の実績

表-5 海外での中温化技術等の評価方法

分類	試験項目	試験方法	検討国				日本での実施可能性
			アメリカ	ドイツ	ノルウェー	フランス	
Workability (作業性)	Nynas Workability Tester	締固めていない混合物をフィニッシュのスクリードを模したブレードで押した時の抵抗力	○				×
	PCG試験	ジャイレトリコンパクタで100回転回した時の空隙率	○		○	○	○
	Umass Workability Tester	一定速度でブレードを回転させた時のトルク	○				△
Moisture (水分抵抗性)	Duriez試験 (水浸圧縮試験)	水浸養生、非水浸養生の供試体の一軸圧縮試験を行った時の一軸圧縮強度比				○	○
	Hamburg Wheel tracking test	ハンブルグホイールトラッキング試験を用い、水浸状態で2万回走行させた時の離転移点	○				×
	Indirect Tensile Strength Test	マーシャル供試体を用い、標準状態と水浸状態で圧裂試験を行った時の引張強度比(TSR)	○		○		○
Rutting (流動抵抗性)	Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)	円柱供試体の軸方向に振幅加重を与え、Flow Numberを求め、交通量により評価	○				×
	Asphalt Pavement Analyzer (APA)	円形供試体の上部に車輪を走行させ、走行回数と変位量を計測	○				×
	Hamburg Wheel tracking test	ハンブルグホイールトラッキング試験を用い、3万回走行させた時の変形率	○	○	○		×
	Orniereur test (LPCホイールトラッキング試験)	LPCホイールトラッキング試験を用い、3万回走行させた時の変形率				○	×
	Kim test (韓国変形強度試験)	円形供試体に鋼製の荷重棒を貫入させた時の最大荷重と沈下深さにより変形強度を求める					△
Fatigue (疲労抵抗性)	2 point bending fatigue test	台形供試体を用いた2点曲げ試験で、下端を固定し先端部を振幅させる				○	△
	3 point bending fatigue test	直方体供試体により3点曲げ試験を行う		○			○
	4 point bending fatigue test	長さ37.5cm、幅6.25cm、厚さ5cmの供試体を用い、4点支持の繰り返し曲げ試験を行う	○				○
	Tension compression tests on cylindrical specimens	円柱供試体を用い、引張圧縮試験を行う	○				○

次に、中温化技術の混合物性状の評価方法について、既存文献調査により評価項目の分類、試験項目、試験方法、検討国等を取りまとめた結果を表-5に示す。検討国として取り上げた国は、アメリカ、ドイツ、ノルウェー、フランスである。

評価項目分類として主に採用されているのは、Workability (作業性)、Rutting (流動抵抗性)、Fatigue (疲労抵抗性)、Moisture (水分抵抗性)であった。特に、中温化技術の混合物性状として重要視されているのは作業性であった。流動抵抗性や疲労抵抗性、水分抵抗性については通常混合物と同等な試験値であることを示す報告であったのに対し、作業性については通常混合物より評価値が優れることについて報告が多かった。作業性を評価する試験方法は様々であったが、多く用いられていたのはPCG試験であった。PCG試験は、ジャイレトリコンパクタ等を用いて回転数と混合物の空隙率により締固めやすさを評価するものであるが、日本においても保有している研究機関や道路会社もあり同様な調査は可能である。

水分抵抗性については、間接引張強度試験や水深圧縮試験等が行われており、日本においても実施可能である。しかし、供試体の養生方法、養生期間、試験温度等の試験条件が各国により異なることから、日本における適用に向けてこれら試験方法の検討・確立が必要である。

流動性試験については、ハンブルグホイールトラッキング試験、Orniereur、APA、AMPT、変形強度試験等が様々な試験が行われており、いずれも日本での試験機の保有を考慮に入れると実施が困難

である。日本では一般的なホイールトラッキング試験を含め、試験方法を検討する必要がある。また、疲労抵抗性についても、2点曲げ試験、3点曲げ試験、4点曲げ試験、引張圧縮強度試験等様々な試験を行っていることから、試験方法に関する検討が必要である。

今後、中温化の性能指標として、作業性、水分抵抗性、流動抵抗性、疲労抵抗性が必要であり、評価方法および評価基準値の設定にあたっては、これら海外での評価方法を踏まえつつ、日本の気象条件や交通条件等に即した試験条件、試験研究所および道路会社の試験機の保有状況などを考慮にいたった検討が必要である。

3.2 舗装のライフサイクル CO₂ 評価に関する検討

(1) 低燃費舗装の CO₂ 改善効果の試算

道路種別毎の自動車からの CO₂ 排出量を図-2に示す。高規格幹線道路および一般国道の CO₂ 排出量が多いのが分かる。これは交通量 (特に大型車) が多

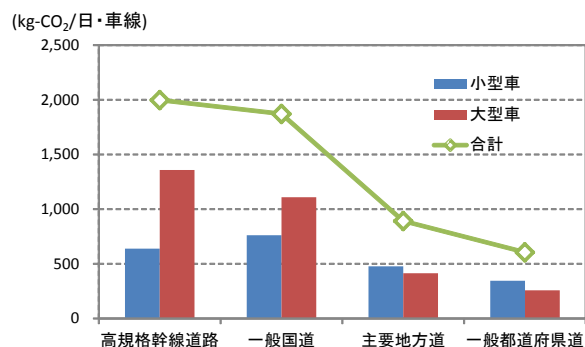


図-2 道路種別毎の自動車からの CO₂ 排出量

7.2 低炭素社会を実現する舗装技術の開発および評価手法に関する研究①

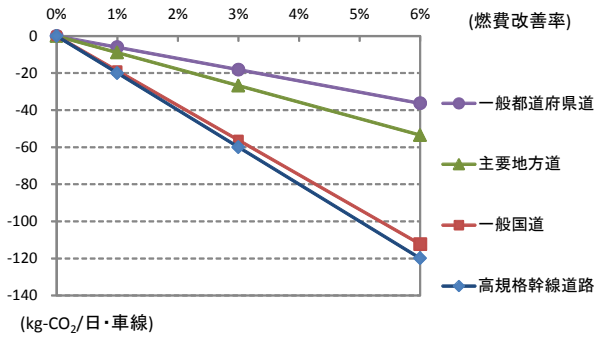


図-3 燃費が改善した場合の CO₂ 排出量の差

いことに起因している。次に、低燃費舗装により自動車の燃費が改善した場合の CO₂ 排出量の差を、燃費改善率毎に試算した結果を図-3 に示す。高規格幹線道路および一般国道が CO₂ 排出量の差が多いため、低燃費舗装は交通量が多い路線に適用することにより、一層効果があることが言える。

(2) 舗装のライフサイクル CO₂ との比較

3.2(1) で求めた道路種別毎の自動車からの CO₂ 排出量と As 舗装および Co 舗装のライフサイクル CO₂ の試算結果を図-4 に示す。As 舗装および Co 舗装の回帰直線の傾きが約 21 に対して、道路種別毎の CO₂ の傾きが 221~730 であることから自動車由来の CO₂ 排出量が舗装のライフサイクル CO₂ と比較して非常に多いことが分かる。

次に、低燃費舗装の導入による自動車由来の CO₂ 排出量と舗装のライフサイクル CO₂ への影響について試算した結果を図-5 に示す。図中の破線が既設舗装として通常の As 舗装のライフサイクル CO₂ である。0 年の時に低燃費舗装 (Co 舗装および As 舗装) を打ち換えることによって、打換え時は CO₂ が増えることになる。その後、低燃費舗装の適用により、図-2

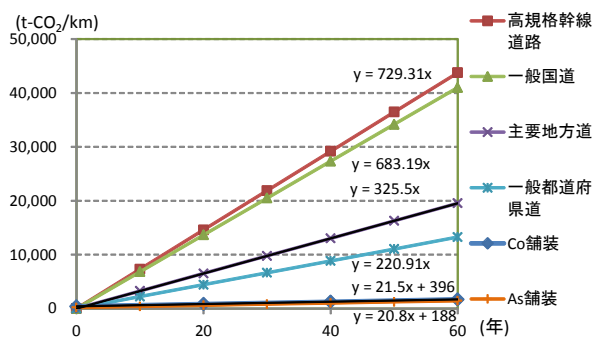


図-4 自動車由来および舗装の CO₂ 排出量

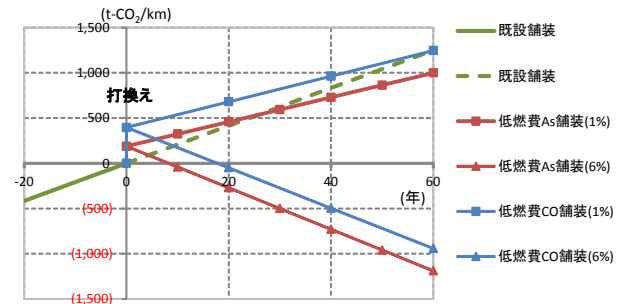


図-5 低燃費舗装に打換え後の LCCO₂

で示したように自動車からの CO₂ 排出量の低減分が差し引かれるため、燃費低減率が 1% の舗装 (図中の低燃費 Co 舗装、低燃費 As 舗装) でも既設の舗装より、ライフサイクル CO₂ 排出量を低減させる可能性があることが分かった。

4. まとめ

本研究の主な結果をまとめると以下のとおりである。

- ・海外における中温化技術は2千万トン以上製造され、日本の施工実績に比べると非常に多く、今後日本の中温化技術も広く普及する可能性はある
 - ・海外の中温化技術の性能評価項目は、主に作業性、水分抵抗性、流動抵抗性、疲労抵抗性について検討されており、日本においても性能評価方法の確立が望まれる
 - ・低燃費舗装は重交通路線に適用すると CO₂ 削減効果が高い
 - ・自動車由来の CO₂ 排出量が多いことから、低燃費舗装にすることで舗装のライフサイクル CO₂ は減る可能性がある
- 今後も、低炭素舗装技術の高度化やライフサイクル CO₂ 評価について検討を進める予定である。

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) NAPA: Warm-Mix Asphalt Best Practices 2nd Edition, 2011.2
- 3) NAPA: 2nd International Warm-Mix Asphalt Conference Proceedings, 2011.10
- 4) G. W. Taylor, et al.: Effect of Pavement Structure on Vehicle Fuel Consumption - Phase III, National Research Council Canada, Canada, 2006
- 5) 吉本他: 高速道路での重量車の転がり抵抗の測定と燃費に及ぼす影響に関する研究、土木学会舗装工学論文集、

7.2 低炭素社会を実現する舗装技術の開発および評価手法に関する研究①

第14巻、2009年.12

- 6) 大城他:自動車走行時の燃料消費率と二酸化炭素排出係数、土木技術資料、Vol.43、No.11、pp.50-55、2001.
- 7) 国土交通省道路局:平成22年度 全国道路・街路交通情勢調査(道路交通センサス)一般交通量調査集計表、2011.9
- 8)川上他:舗装の長寿命化・延命化によるCO₂排出量の抑制効果について、土木学会舗装工学論文集、第15巻、2010.12
- 9) 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
- 10)Colas Switzerland: Promoting the Widespread Use of VALORCOL, Innovative Practices for Greener Roads, IRF, 2009.
- 11)守安他: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
- 12)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.

7.2 低炭素社会を実現する舗装技術の開発および評価手法に関する研究①

7.2 A study on development and evaluation methods 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

【英文要旨】

For realization of the low carbon society, some pavement technologies for reducing CO₂ emissions are developing. The objectives of this study are the development of low CO₂ emissions pavement technologies and its evaluation methods.

In 2011, the current status of low CO₂ emissions pavement technologies were organized, and the research status of warm mix asphalt and its evaluation methods in foreign countries were researched. Furthermore, the new pavement technologies that reduce fuel-efficient of cars were evaluated for the life-cycle CO₂. The result showed that the this pavement was effective to adapt at heavy traffic road and have high possibility to reduce the life-cycle CO₂.

【英文キーワード】

Low CO₂ emission pavement, Warm mix asphalt, evaluation method, Life-cycle CO₂