

## 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②

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：材料資源研究グループ（新材料）

研究担当者：西崎到、新田弘之、辻本陽子

### 【要旨】

低炭素社会の早期実現に向け、各方面でCO<sub>2</sub>削減技術・工法が開発が進められている。舗装分野においても、低炭素化に有効と考えられる技術が多数あり、材料の低炭素化、工事における低炭素化、資源有効利用による低炭素化など多様である。これら個々の舗装技術は、元々は施工効率の向上やリサイクル性能の向上などを主な目的として開発されてきており、CO<sub>2</sub>削減の観点からの取り組みは十分とは言えない。そこで、本研究では舗装分野におけるCO<sub>2</sub>削減を目的として、舗装材料のさらなる低炭素化技術の開発を進めるとともに、より有効な利用や、確実な効果を得るために、適用範囲、評価方法などをあきらかにしていく。

平成 26 年度は、①中温化剤を用いたアスファルトの基礎物性の把握、②新しく開発した中温化技術を適用したアスファルト混合物のCO<sub>2</sub>排出量の削減効果を明確化した。その結果、熱分析を行うことで広範囲の温度域の化学性状を把握することが可能となり、アスファルトバインダの熱特性と物理性状を表す粘弾性状との相関が得られた。一方、CO<sub>2</sub>排出量の削減効果について、新しい中温化剤や常温施工型混合物のCO<sub>2</sub>排出量を算出した。その結果、新しい中温化剤の開発により、アスファルト混合物の輸送から製造までに係るCO<sub>2</sub>排出量が従来品よりも低減され、また、再生混合物に対して本開発品を適用することで、通常の再生混合物よりもさらにCO<sub>2</sub>排出量削減効果が得られることが明らかとなった。

キーワード：低炭素、舗装材料、中温化剤、熱分析、再生骨材、CO<sub>2</sub>排出原単位

### 1. はじめに

低炭素社会の早期実現に向け、各方面でCO<sub>2</sub>削減技術・工法が開発が進められている。舗装分野においても、低炭素化に有効と考えられる技術が多数あり、材料の低炭素化、工事における低炭素化、資源有効利用による低炭素化など多様である。これら個々の舗装技術は、元々は施工効率の向上やリサイクル性能の向上などを主な目的として開発されてきており、CO<sub>2</sub>削減の観点からの取り組みは十分とは言えない。

そこで、本研究では舗装分野におけるCO<sub>2</sub>削減を目的として、舗装材料のさらなる低炭素化技術の開発を進めるとともに、より有効な利用や、確実な効果を得るために、適用範囲、評価方法などをあきらかにしていく。

平成 26 年度は、①中温化剤を用いたアスファルトの基礎物性の把握、②新しく開発した中温化技術を適用したアスファルト混合物のCO<sub>2</sub>排出量の削減効果を明らかにした。

### 2. 中温化アスファルトバインダの基礎物性に関する検討

#### 2.1 概要

中温化技術とは、アスファルト混合物の製造および施工温度を従来よりも 30℃以上低下させても、通常の加熱混合物と同等の作業性や締固め度などの性状を満足するものを指す。そのため、中温化アスファルト混合物の性状評価について、締固め性等の現場施工に即した結果を報告したものが多く、しかし、アスファルトバインダの性状変化については言及がなされておらず、広範囲の温度条件での系統的な測定もされていない。そこで本研究は、中温化剤によるアスファルトバインダの広範囲の温度条件での性状変化を把握することを目的として行った。まず、比較的簡便に広範囲の温度域での性状変化が把握できる示差走査熱量測定により、アスファルトバインダの熱特性を調べ、同様の温度域で粘弾性状についても調べた。得られた結果を基に、熱特性と粘弾性状の関係についても検討した。

#### 2.2 方法

##### (1) 熱分析

本研究で使用した材料や基本性状を表-1 に示す。中温

## 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②

化剤を添加したアスファルトバインダ(以下、中温化アスファルト)に対して、融点やガラス転移点等の性状変化を調べるために、示差走査熱量測定(DSC)を行った。アスファルト試料およびレファレンスとしてアルミナをそれぞれ 10 mg 程度採り、測定に供した。測定の温度範囲はストレートアスファルト(以下、StAs)の場合は-60 °Cから 180 °C、ポリマー改質アスファルト II 型(以下、II 型)では-60 °Cから 200 °Cに設定した。測定の際、アスファルトがサンプルケースに広がるよう、一旦高温にしたのち、温度を下げ、上述の温度範囲で測定を実行した。

表-1 実験に使用したベース試料の基本性状

試料名 (文中の表記)	グレード等	針入度 (1/10mm)	軟化点 (°C)
StAs	ストレートアスファルト 60/80	中温化剤 無) 67	中温化剤 無) 47
		有) 39	有) 80.5
II 型	ポリマー改質アスファルト II 型	無) 47	無) 60.5
		有) 30	有) 89.0
中温化剤	粘弾性調整系 (Wax タイプ)	-	-

### (2) 粘弾性状試験 (DSR 試験)

動的粘弾性状の測定を舗装調査・試験法便覧(A062)に準拠して行った。測定温度の範囲は-20 °Cから 120 °Cまでとした。広範囲の温度領域で測定を行うため、それぞれの温度で適切な大きさの治具(平行プレート)を使用した。また、測定温度領域を 3 つ(60~40 °C、30~10 °C、0~-20 °C)に分け、それぞれの間温度にてあらかじめひずみスイープ試験を行い、得られた線形限界値をもって本試験のひずみ条件とした。

### (3) 回転粘度計による粘度測定

高温領域では、アスファルトバインダが粘弾性から粘性体へと変化することが予想された。そこで、二重円筒回転型計により高温域の粘度測定を行った。測定にはそれぞれのベースアスファルトと、中温化剤を 3.0 % 添加したものを実験に供した。測定の温度範囲は 80 °Cから 120 °Cである。

## 2.3 検討結果

### (1) 熱分析

熱分析の結果として、2 種類のベースアスファルトと中温化剤を加えた試料の DSC を図-1、2 に示す。どちらのベースアスファルトでも-50 °Cから 30 °Cの間で DSC

が階段状に変化しており、これはガラス転移によるものと考えられる。この領域では II 型のほうがわずかに高温側にシフトした。また StAs では 60 °C を超えた辺りで変曲が見られ、II 型では 80 °C 付近で見られたため改質剤の影響の可能性が考えられたが、かなり小さな変化であるため、結論するためにはさらに多くの測定による確認が必要と考えられた。中温化アスファルトの DSC が 105 °C 付近で吸熱によるピーク値を示しており、この温度は中温化剤由来の融点に相当するものと考えられた。また、中温化剤の添加量が多いほど DSC の絶対値が大きくなった。これは、中温化剤の融解に要する熱量が多いことを意味しており、妥当な結果だと言える。

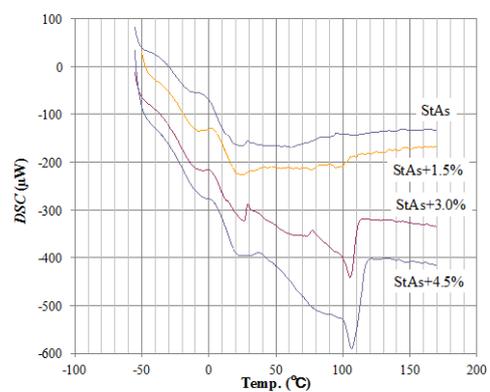


図-1 StAs ベースのバインダの DSC

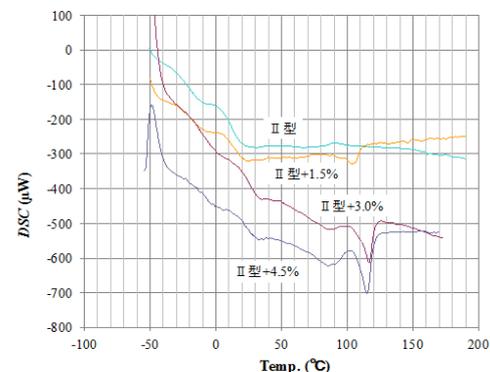


図-2 II 型ベースのバインダの DSC

### (2) アスファルトバインダの粘弾性状

中温化剤を添加した StAs および II 型バインダの動的粘弾性(複素弾性率  $G^*$  および位相角  $\delta$ ) の変化を図-3 から図-6 に示す。70 °C 以上の高温領域については、ベースバインダと中温化剤 3.0 % の中温化アスファルトのみ測定した。

StAs については図-3 に示すように 80 °C 未満の温度領域では中温化剤の添加によりわずかに複素弾性率  $G^*$  が大きく、80 °C を超すと逆転してわずかに小さくなった。

図-4 に示すように位相角  $\delta$  は中温化剤添加により低温で小さく、0 °C以上で大きくなった。80 °C以上で位相角はほぼ一定値に収束しており、高温領域にてアスファルトの粘性の影響が支配的となっていることを表している。

II型では図-5 に示すように中温化剤の添加量の増加に伴い、温度に対する複素弾性率  $G^*$  の値は高い方へシフトする傾向にあった。特に 10 °Cから 70 °Cの間の測定で添加量の差が大きくなった。90 °Cと 100 °Cの間で、ベースアスファルトと中温化アスファルトの値の大小関係が逆転しており、StAs と同様の傾向を示した。また、図-6 に示すように添加量が多いほど位相角は小さくなった。これは中温化剤そのものが硬化し粘性が低下するため、位相角が小さくなったと考えられた。また、StAs と比べると、II型の位相角は全体的に小さく、位相角が一定値に達する温度が高かった。

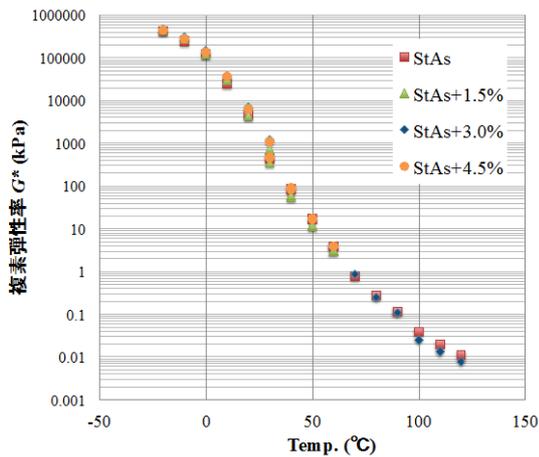


図-3 ストレートアスファルトの複素弾性率

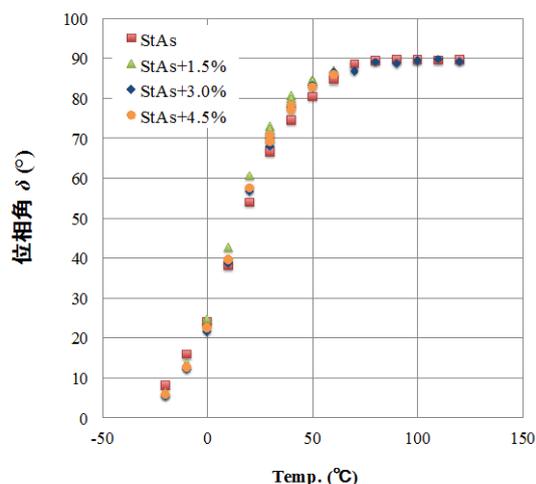


図-4 ストレートアスファルトの位相角

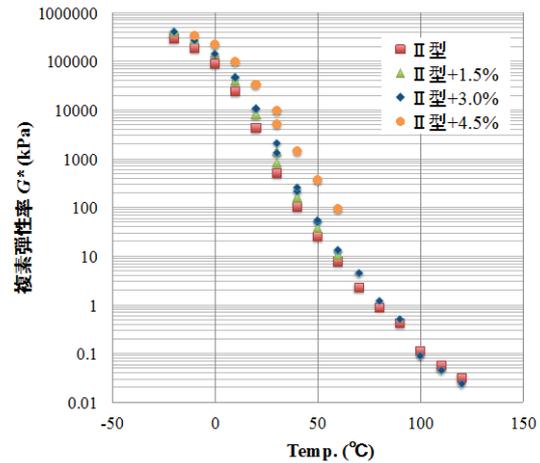


図-5 改質アスファルトの複素弾性率

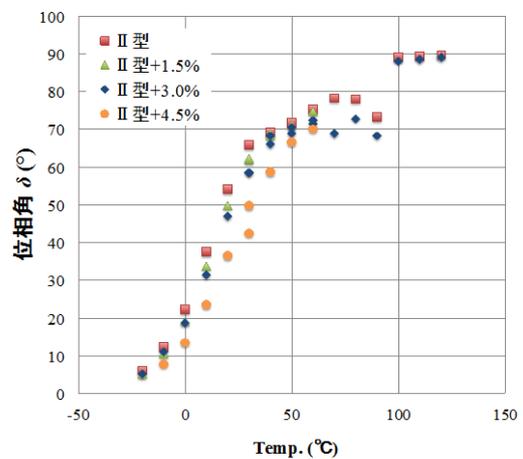


図-6 改質アスファルトの位相角

### (3) 高温領域におけるアスファルトバインダの粘性

粘弾性測定の結果から、80 °C以上ではアスファルトは概ね粘性的なふるまいをすることが分かった。そこで、80 °Cから 120 °Cの範囲において、回転粘度計による粘度測定を行った。結果を図-7 に示す。StAs では、中温化剤を 3 % 添加した中温化アスファルトの方が温度の増加に対する粘度の低下が顕著であり、感温性が高いと言える。また、中温化剤を添加したものは 105 °C 付近で粘度が大きく変化しており、DSC の融点 (図-1) と概ね一致した。

一方、II型では中温化剤の添加による粘度の違いはあまりなく、105 °C 付近の変化も観察できなかった。これは改質剤の影響で、測定した温度範囲でもまだ十分に粘性的ではなかった可能性が考えられた。

### (4) DSC と粘弾性状との関係

粘弾性測定を行った温度領域(-20 ~ 120 °C)における

## 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②

DSCの結果(図-1、2)から、2点のガラス転移点、0℃付近および25℃付近、と1つの融点(105℃)を読み取ることができる。これらの相転移点前後の粘弾性状の変化を検証するために、貯蔵弾性率 $G'$ および損失弾性率 $G''$ を調べたところ、低温では貯蔵弾性率が損失弾性率を上回っており、反対に、高温では損失弾性率が上回っていることを見出した(図-8)。特に、20℃から10℃にかけて両者の弾性率が交差しており、物理性状の相転移が起こっていると考えられる。アスファルトにおいても同様の性状変化が起きているため、DSCから読み取れるガラス転移点が、物理性状の転移点と一致したと考えられる。

今後、熱分析を舗装材料の評価ツールとするために、より多くの種類の中温化剤、バインダなどに対するの測定やデータの蓄積が必要である。

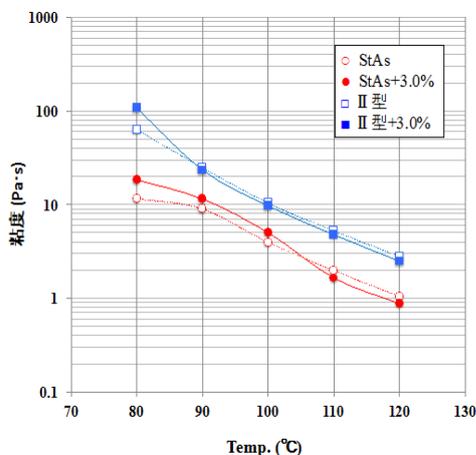


図-7 高温域のアスファルトの粘度

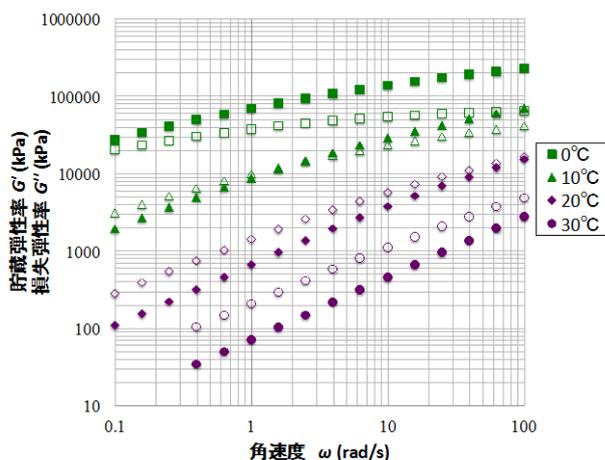


図-8 StAs+3.0%の貯蔵弾性率および損失弾性率  
(黒塗りは貯蔵弾性率 $G'$ 、白抜きは損失弾性率 $G''$ )

## 3. 新しい舗装材料のCO<sub>2</sub>排出量低減効果の検証

### 3.1 概要

中温化技術を適用することで、アスファルト混合物製造時の温度を下げる事が可能となり、燃料消費が抑制され、これによりCO<sub>2</sub>排出量を削減できる。すでに様々な中温化剤が開発されており、通常150~180℃程度のもを30℃程度低減させることが可能になっている。中温化技術に用いられる主な中温化剤には、発泡系、粘弾性調整系、滑剤系などのタイプが開発されている。

これまで以上のCO<sub>2</sub>排出量の削減を目指して、製造温度をさらに50℃程度低減できるものや、再生混合物に適用して製造温度を20~30℃程度低減できるものを、民間企業と共同研究により開発してきた。H26年度は、新しく開発された舗装材料について、CO<sub>2</sub>排出量の低減率を算出したので報告する。

## 3.2 検討方法

### (1) 計算方法

CO<sub>2</sub>排出量原単位は、「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。中温化剤を含まない、通常の加熱アスファルト混合物および再生混合物のCO<sub>2</sub>排出量原単位の計算例を表-2および表-3に示す。これらの表を基本にして、添加剤によるCO<sub>2</sub>排出量を、製造温度低減による燃料消費削減を加味して、算出した。

表-2 CO<sub>2</sub>排出原単位計算例

名称	単位	数量	原単位 (kg-CO <sub>2</sub> /単位)	CO <sub>2</sub> 排出量 (kg-CO <sub>2</sub> )	数量の引用元、根拠	
素材	6号砕石	t	287.28	7.98	2292.49	配合設計書
	7号砕石	t	120.96	7.98	965.26	配合設計書
	砕砂	t	120.96	7.98	965.26	配合設計書
	粗砂	t	120.96	11.54	1395.68	配合設計書
	細砂	t	60.48	11.54	697.94	配合設計書
	石粉	t	45.36	5.41	245.40	配合設計書
	ポリマー改質アスファルトII型	t	44.00	488.82	21508.08	配合設計書
輸送	軽油	L	608.58	4.19	2549.95	運搬総量529.2[t]×輸送距離20km×運搬トンキロあたり燃料消費量0.0575[l/(t/km)]、改良トンキロ
	軽油	L	208.66	4.19	874.29	運搬総量181.44[t]×輸送距離20km×運搬トンキロあたり燃料消費量0.0575[l/(t/km)]、改良トンキロ
	軽油	L	52.16	4.19	218.55	運搬総量45.36[t]×輸送距離20km×運搬トンキロあたり燃料消費量0.0575[l/(t/km)]、改良トンキロ
	軽油	L	359.04	4.19	1504.39	運搬総量44[t]×輸送距離240km×運搬トンキロあたり燃料消費量0.0341[l/(t/km)]、改良トンキロ
製造	電力	kWh	8000.00	0.46	3680.00	アスファルトプラント消費実績
	A重油	L	6782.00	2.91	19735.62	アスファルトプラント消費実績
	軽油	L	256.00	2.95	755.20	アスファルトプラント消費実績
未集計分等見込み(アスコン)	t	800.00	7.72	6176.00		
計				63564.31		
あたり				79.46		

## 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②

表-3 再生混合物のCO<sub>2</sub>排出量の計算例

名称	単位	数量	原単位 (kg-CO <sub>2</sub> /単位)	CO <sub>2</sub> 排出量 (kg-CO <sub>2</sub> )	数量の引用元、根拠		
						再生混合物	加熱混合物
素材	6号砕石	t	114.92	7.96	917.06	配合設計書	
	7号砕石	t	48.38	7.96	386.07	配合設計書	
	砕砂	t	48.38	7.96	386.07	配合設計書	
	粗砂	t	48.38	115.4	558.31	配合設計書	
	細砂	t	24.19	115.4	279.15	配合設計書	
	石粉	t	18.15	5.41	98.19	配合設計書	
	再生骨材(60%)	t	480.00	2.24	1075.20	配合設計書	
	アスファルト	t	17.60	107.56	1893.06	配合設計書	
輸送	軽油	砕石輸送 20 km	L	243.43	4.19	1019.97	定輸送容量529.2 [l]×輸送距離20 km× 空重トンキ口あたり燃料消費量 0.0675(l/A/km)、改良トンキ口
	軽油	砂輸送 20 km	L	13.46	4.19	349.70	定輸送容量181.44 [l]×輸送距離20 km× 空重トンキ口あたり燃料消費量 0.0675(l/A/km)、改良トンキ口
	軽油	石粉輸送 20 km	L	20.87	4.19	87.45	定輸送容量45.36 [l]×輸送距離20 km× 空重トンキ口あたり燃料消費量 0.0675(l/A/km)、改良トンキ口
	軽油	アスファルト 輸送 2.40 km	L	143.62	4.19	601.77	定輸送容量44 [l]×輸送距離2.40 km× 空重トンキ口あたり燃料消費量 0.0349(l/A/km)、改良トンキ口
製造	電力	kWh	8000.00	0.46	3680.00	アスファルトプラント消費実績	
	A重油	L	7760.00	2.91	22581.60	アスファルトプラント消費実績	
	軽油	L	256.00	2.95	755.20	アスファルトプラント消費実績	
	未集計等見込み (アスエ)	t	800.00	7.72	6176.00		
計					40844.79		
あたり					51.06		

本舗装材料の使用によるCO<sub>2</sub>排出量の低減値を、下記の式に基づいて算出する。

$$A=(B-C)/B \times 100 \quad (1)$$

(A:CO<sub>2</sub>排出量低減率(%))

B:通常混合物のCO<sub>2</sub>排出量

C:中温化混合物のCO<sub>2</sub>排出量)

### (2) 評価した技術

評価した技術は、よりCO<sub>2</sub>排出量削減効果を向上させたものであり、民間企業と共同開発した技術である。評価下技術を以下に示す。

- ① 開発品 A ... 発泡系中温化剤を添加したもの。添加量はアスファルト量の 1.5 %
- ② 開発品 B ... 常温施工型の中温化技術
- ③ 開発品 C ... 再生混合物(再生骨材 40 %)に対して中温化剤を添加する。添加量はアスファルト量の 1.5 %
- ④ 開発品 D ... 再生混合物(再生骨材 60 %)に対して中温化剤を添加する。添加量はアスファルト量の 1.5 %

### 3.3 新規混合物への中温化技術適用によるCO<sub>2</sub>排出量削減効果の試算

従来、ポリマー改質アスファルト II 型を使用した中温

化混合物であっても、CO<sub>2</sub>排出量の低減率は 3.8 % であった。H26 年度の開発品では、従来よりも製造温度を 50 °C 低減させることに成功しており、CO<sub>2</sub>排出量の低減率は 5.3 %、13.8 % に達した(図-9)。中温化剤を加えることで、中温化剤に係るCO<sub>2</sub>排出量が増加するが、一方で、中温化混合物の製造温度の低減により、製造に係る重油の量が減ったことで、結果的にCO<sub>2</sub>排出量削減効果が得られたと考えられる。

今後は、他の舗装材料のCO<sub>2</sub>排出量も併せてまとめ、データベースがする予定である。

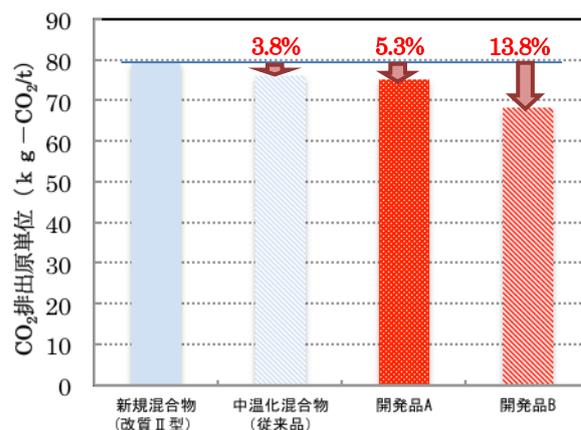


図-9 開発した中温化技術のCO<sub>2</sub>低減効果の比較(II型)

### 3.4 再生混合物への中温化技術適用によるCO<sub>2</sub>排出量削減効果の試算

近年、加熱アスファルト混合物に対して再生骨材を使用した再生アスファルト混合物(以下、再生混合物)の普及が進んでおり、再生混合物のシェアは約 75 % に達している。再生混合物の製造そのものは、低炭素社会の実現に寄与するリサイクル技術のひとつであるが、これに中温化技術を付与することで、さらなるCO<sub>2</sub>排出量削減が見込まれるため、その適用が望まれる。

表-3 に、再生骨材率 60 % とした場合の、再生混合物のCO<sub>2</sub>排出量を示す。また、これらの再生混合物におけるCO<sub>2</sub>排出量削減効果をもたらす要因を検討するために、素材、輸送および製造時でのCO<sub>2</sub>排出量の比較を図-10 に示す。中温化技術の適用により製造時のCO<sub>2</sub>排出量は低減されているが、本試算においてはStAsの使用を想定しているため、II型使用時よりは少ないと考えられる。再生混合物は、再生骨材の加熱に係るエネルギーが多いため、通常の加熱混合物に比べてCO<sub>2</sub>排出量が多くなる。一方、素材や輸送に係る排出量が少ないために、結果としてCO<sub>2</sub>排出量が抑えられたと考えられる。

図-11 に従来品と比較したときのCO<sub>2</sub>排出量をまとめ

た。再生骨材の配合率が高いほど、削減効果が顕著である。また、式(1)に基づき、CO<sub>2</sub>排出量の低減率を算出したところ、再生骨材率が40%の場合で低減率は2.7%、骨材率を60%とした場合では9.2%であった。この再生混合物に対して開発品の中温化剤をアスファルト量に対して1.5%添加すると、それぞれ再生混合物において7.8%、14.3%のCO<sub>2</sub>排出量の低減効果があることがわかった。

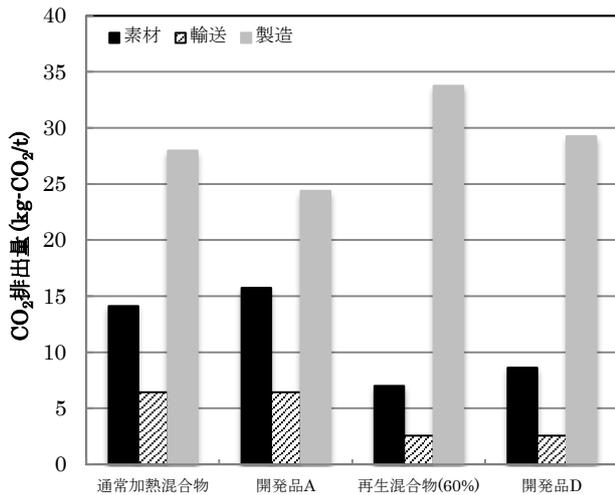


図-10 工程毎のCO<sub>2</sub>排出量の比較

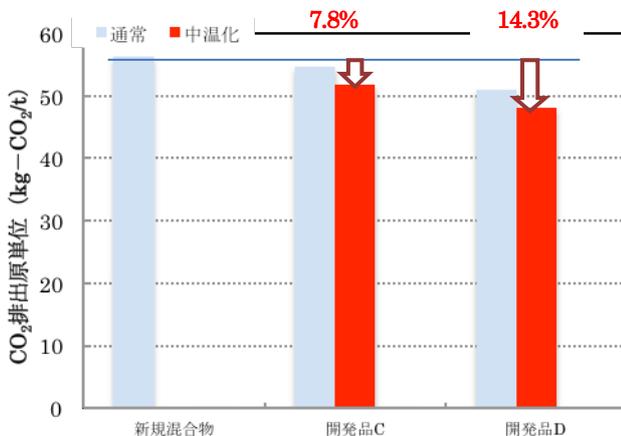


図-11 CO<sub>2</sub>排出量の比較

#### 4. まとめ

平成26年度に得られた結果は、次の通りである。

- 示差走査熱量測定により、広範囲の温度領域におけるアスファルトバインダの熱特性から化学性状を把握することが可能である。
- アスファルトバインダの熱特性と物理性状を表す粘弾性状との間に相関が得られた。
- 開発した中温化剤により、CO<sub>2</sub>排出量が低減された。特に、常温施工型の使用による削減効果が大きい。
- 再生混合物は、再生骨材配合率の増加に伴い、CO<sub>2</sub>排出量が少なくなる。
- 再生混合物に対して中温化技術を適用することで、さらにCO<sub>2</sub>排出量の削減が見込まれる。

#### 参考文献

- 辻本他：中温化アスファルトバインダの熱特性と粘弾性状、舗装工学論文集、vol.19, 2014.
- 舗装委員会 舗装性能評価小委員会：舗装の環境負荷低減に関する算定ガイドブック、日本道路協会、2014.

## A STUDY ON DEVELOPMENT AND EVALUATION METHODS OF PAVEMENT TECHNOLOGY FOR LOW-CARBON SOCIETY (2)

**Budgeted** : Grants for operating expenses

General account

**Research Period** : FY2011-2015

**Research Team** : Materials and Resources Research Group  
(Advanced Materials)

**Author** : NISHIZAKI Itaru

NITTA Hiroyuki

TSUJIMOTO Yoko

**Abstract** : For early realization of a low carbon society, low carbon technologies in pavement area are being developed actively. They are, for instance, the materials whose CO<sub>2</sub> emission is reduced during the production, the technique that saves energy consumption for construction works, and the technique that utilizes recycling materials. They are originally developed for the improvement in construction efficiency, recycling performance, etc. however further carbon reduction is possible for such technology. So, in this research, the development of further carbon reduction technology for pavement materials is attempted. Also, the applicability and the evaluation method for these materials will be clarified.

The 2014 fiscal year is the forth year of this research. Studies contents are as follows: (1) the evaluation of the fundamental physical characteristics of warm-mix asphalt binder, (2) the estimation of CO<sub>2</sub> emission of the new materials for WMA.

**Key words** : low-carbon society, paving materials, warm mix asphalt (WMA), thermal analysis, recycled hot mix asphalt, CO<sub>2</sub> emission unit