溶融スラグ等の舗装への適用性評価に関する研究（２）

研究予算：一般勘定（道）
研究期間：平 17～平 20
担当チーム：道路技術研究グループ（舗装）
研究担当者：久保和幸、加納孝志

【要旨】
近年、資源の有効活用、最終処分場の逼迫などを背景として、溶融スラグをはじめとした再生資材の開発が盛んとなっており、なかでも舗装用として他産業からの再生資材の開発が製造者側を中心に多くなされている。しかし、これらの他産業再生資材は、リサイクルにはなっているものの、製造時から廃棄に至るまでの全過程での環境負荷やコストの低減に寄与しているかが不明なのが現状である。
本研究では、道路舗装分野で利用実績のある他産業再生資材の排出量およびリサイクル率について調査するとともに、一部の資材については室内試験および促進載荷試験を実施し、舗装での適用性について耐久性の面から検討した。また、アスファルト舗装材に他産業再生資材が混入し繰り返し再生利用された場合の当該再生資材の蓄積状況を推定するとともに、耐久性が低下した場合のライフサイクルコスト(LCC)について試算した。その結果、他産業再生資材を使用する場合には、混入量や他産業再生資材の製造方法等を考慮することで、通常の舗装用資材と同程度の耐久性を確保できることが明らかになった。また、舗装発生材が繰り返し再利用されることで他産業再生資材の蓄積量は増加し、耐久性が低下した場合には LCC が増加することがわかった。さらに、舗装への適用性評価指標となる素材の品質評価項目に関する検討を行った。
キーワード：リサイクル、非鉄金属溶融スラグ、廃タイヤ、溶融スラグ、廃プラスチック、耐久性、LCC

１．はじめに

近年、資源の有効活用、最終処分場の逼迫などを背景として、溶融スラグをはじめとした再生資材の開発が盛んとなっており、なかでも舗装用として他産業からの再生資材の活用の検討が製造者側を中心に多くなされている。しかし、これらの他産業再生資材は、リサイクルにはなっているものの、製造時から廃棄に至るまでの全過程において、一般的な砕石などの骨材に優る舗装材料としての性能を有しているのか不明なのが現状である。排出される再生資材を利用することの便益と、これを使用することが舗装の維持更新サイクルに与えるコストをよく勘案して、長期的な視点で有効性を判断する必要がある。

本研究では、道路舗装分野で利用実績のある他産業再生資材の排出量およびリサイクル率について調査するとともに、一部の資材については室内試験および促進載荷試験を実施し舗装での適用性について耐久性の面から検討した。また、アスファルト舗装材に他産業再生資材が混入し繰り返し再生利用された場合の当該再生資材の蓄積状況を推定するとともに、耐久性が低下した場合のライフサイクルコスト(LCC)について試算した。さらに、舗装への適用性評価指標となる素材の品質評価項目に関する検討を行った。

２．他産業再生資材の現状調査

他産業再生資材のうち、道路舗装分野で利用実績が多いもしくは利用が検討されている非鉄スラグ(銅、フェロニッケル)、石炭灰、廃プラスチック、廃タイヤについて排出量やリサイクル率等について調査した。

(1)銅スラグ(Cu スラグ)

銅スラグの利用実態調査結果を図-1 に示す。Cu スラグの生産量は近年増加傾向にあり 2000 年度の調査結果では約 240 万ｔ生産され、そのうちの 80%がリサイクルされているが、舗装での利用実績はほとんどない。Cu スラグの生産地は全国 6 箇所（福島県、岡山県、香川県、愛媛県、大分県）であり、その大半は瀬戸内海周辺に集中している。そのため、それ以外の地域では輸送コストがかかるなどの理由により、利用がされにくく、リサイクル率が伸びないものと考えられる。

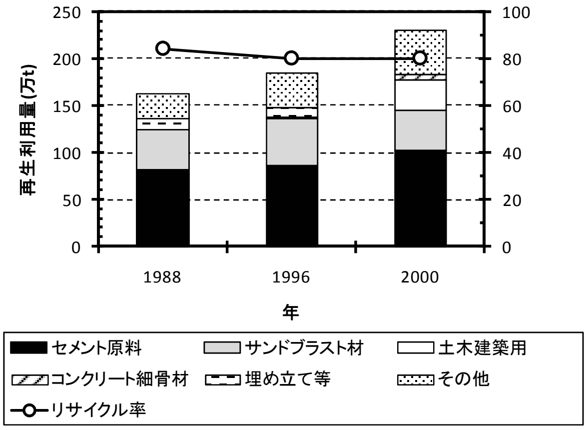

図-1　Cu スラグの生産量とリサイクル率

⑵フェロニッケルスラグ(Fe-Ni スラグ)

Fe-Ni スラグの利用実態調査結果を図-2 に示す。Fe-Ni スラグの生産量は近年増加傾向にあり 2005 年度の調査結果では約 290 万 t 生産され、ほぼ全量がリサイクルされている。舗装での利用量は減少傾向にあるものの、2005 年度は約 40 万 t(14%)が利用されている。Fe-Ni スラグの生産地は全国で 3 箇所(青森県、京都府、宮崎県)であるため、Cu スラグと同様に再生利用に関しては、輸送コストなどを理由にそれ以外の地域での利用が進んでいない。

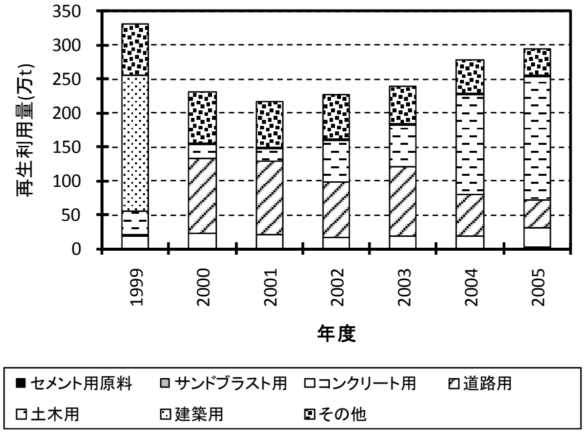

図-2　Fe-Ni スラグの生産量

⑶ 石炭灰

石炭灰の利用実態調査結果を図-3 に示す。石炭灰の生産量は2007年度の調査結果では約1,200万t生産され、そのうちの 97%がリサイクルされているが、舗装用としては、舗装再生便覧に品質規格が定められており、加熱アスファルト混合物用のフィラーや再生路盤材として利用されている。石炭灰の全利用量に占める舗装での利用量の割合は 3%程度である。

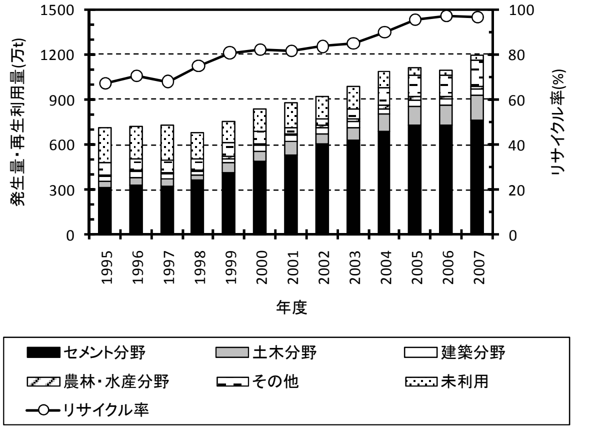

図-3　石炭灰の生産量とリサイクル率

⑷ 廃プラスチック

廃プラスチックの利用実態調査結果を図-4 に示す。廃プラスチックの廃棄量は減少傾向にあり、2007 年度の調査結果では約 270 万 t(約 27%)が廃棄され、リサーマルリサイクルが約 50%、マテリアルリサイクルが約 20%、ケミカルリサイクルが約 3%となっている。舗装では、アスファルトの改質剤としての利用が検討されているものの、供給体制や品質の安定性に課題があり、現状での利用はほとんどない。

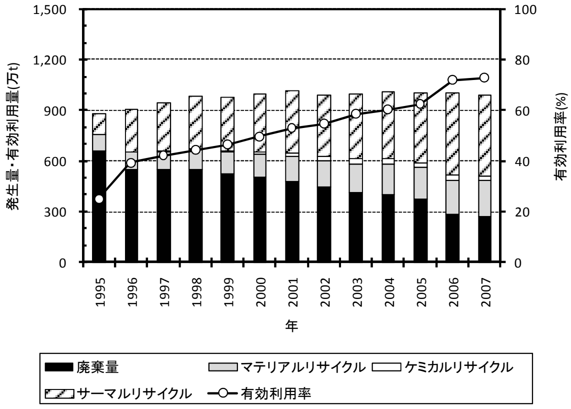

図-4　廃プラスチックの生産量とリサイクル率

⑸廃タイヤ

廃タイヤの利用実態調査結果を図-5 に示す。廃タイヤは 2007 年度の調査結果では約 1,060 万 t 発生し、利用用途の内訳は、サーマルリサイクルが約 57%、マテリアルリサイクルが約 15%、輸出が約 17%、流通在庫や埋め立て処分が約 10%となっている。舗装では、アスファルトの改質剤や物理系凍結抑制舗装、多孔質弾性舗装の材料としての利用が検討されているものの、現状での利用量はごく僅かである。

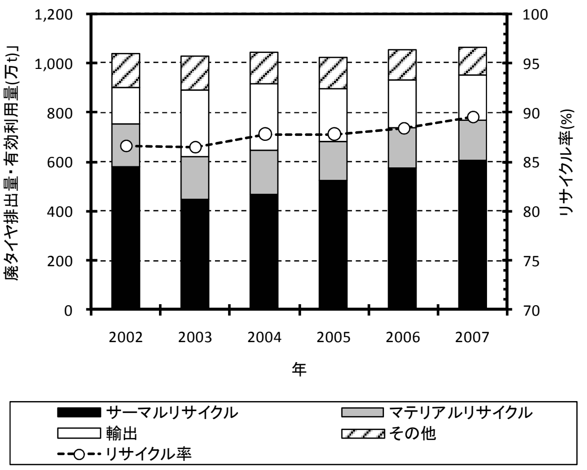

図-5　廃タイヤの生産量とリサイクル率

３．再生資材利用による耐久性への影響評価

３．１　検討の概要

再生資材を利用することにより舗装の耐久性や機能性に影響がある場合、道路利用者や管理者に与える影響は大きい。たとえば供用寿命が低下する場合、舗装の修繕費や路上工事により利用者が被る外部コストが生じる。再生資材を最終処分することなく資材として利用することの便益はあるものの、マイナスに作用するおそれのある部分をよく認識して使用する必要がある。

これらの評価の前提となる耐久性への影響評価として、廃タイヤと廃プラスチックおよび各種の溶融スラグについて、骨材として使用した場合にアスファルト混合物の性状に与える影響を室内試験により確認した。また、舗装走行実験場において非鉄スラグを混入したアスファルト舗装の耐久性試験を行った。

３．２　廃タイヤと廃プラスチックおよび溶融スラグを混入したアスファルト混合物の室内試験結果

(1) 加熱による骨材変形等の確認

廃タイヤおよび廃プラスチックを 60℃および 180℃で１時間加熱し、加熱前後の骨材変形の有無および加熱による臭気の発生過熱について確認した。表-1 に廃プラスチック、廃タイヤの加熱による粒度変化の測定結果を示す。

表のように、廃プラスチックは加熱前に比べ加熱後の通過質量百分率が、粗骨材分(2.36mm 以上)では小さく、細骨材分(2.36mm 以下)では大きくなっており、団粒化と容積の減少が生じているものと考えられる。また、廃タイヤは 加熱前後で通過質量百分率の大きな変化は見られず､熱による形状変形には比較的強いと考えられる。ただし、廃プラスチックおよび廃タイヤとも加熱による異臭の発生が確認された。

表-1　加熱による粒度変化の測定結果

ふるい目 (mm)	廃プラ		廃タイヤ①		廃タイヤ②		廃タイヤ③		廃タイヤ④	
	通過質量百分率		通過質量百分率		通過質量百分率		通過質量百分率		通過質量百分率	
	加熱前	加熱後	加熱前	加熱後	加熱前	加熱後	加熱前	加熱後	加熱前	加熱後
13.2	100.0	91.9	100.0	100.0	100.0	94.3	100.0	100.0	100.0	93.6
4.75	71.5	51.4	100.0	100.0	100.0	89.8	100.0	100.0	100.0	90.4
2.36	6.8	4.9	76.5	78.4	100.0	67.0	72.6	69.9	99.9	67.0
0.60	0.1	8.1	1.2	0.5	4.7	2.3	0.7	0.1	3.8	1.3
0.30	0.0	8.1	0.4	0.0	0.6	0.4	0.6	0.0	0.3	0.0
0.15	0.0	8.1	0.2	0.0	0.3	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0
0.075	0.0	8.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

※加熱温度180℃, 加熱時間1時間

(2)廃タイヤ混入混合物の性状測定結果

密粒度アスファルト混合物(最大粒径 13mm)に廃タイヤを 5～20%添加し、混合物性状を確認した。表-2 に評価した混合物の骨材配合を､表-3 に試験結果一覧を示す。試験結果から、廃タイヤの配合率が多くなるに従って、マーシャル安定度、動的安定度は小さくなり、はく離率は大きくなった。特に水浸ホイールトラッキング試験において供試体が破壊に到るまでの時間は、廃タイヤを10%以上混入した場合で１時間となった。以上のことから、廃タイヤの混入により混合物の耐流動性、はく離抵抗性が低下することが明らかになった。

表-2　骨材配合

使用材料	見掛比重 (g/cm^3)	基本配合			廃タイヤ配合 容積比(vol%)			
		外割 (wt%)	内割 (wt%)	内割 (vol%)	廃タイヤ 5%	廃タイヤ 10%	廃タイヤ 15%	廃タイヤ 20%
6号砕石	2.699	37	34.9	31.9	←	←	←	←
7号砕石	2.685	20	18.9	17.3	←	←	←	←
スクリーニングス	2.678	5	4.7	4.3	←	←	←	←
粗目砂	2.653	25	23.6	21.9	16.9	11.9	6.9	1.9
細目砂	2.667	7	6.6	6.1	←	←	←	←
石粉	2.733	6	5.7	5.1	←	←	←	←
廃タイヤ	1.150	－	－	－	5.0	10.0	15.0	20.0
小計	－	100	94.4	86.6	86.6	86.6	86.6	86.6
アスファルト	1.033	5.6	5.6	13.4	←	←	←	←
合計	－	105.6	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

表-3　混合物性状試験結果

廃タイヤ配合率 (Vol%)	マーシャル安定度 (kN)	動的安定度 (回/mm)	水浸ホイールトラッキング試験	
			はく離率(%)	破壊時間(hr)
0	11.23	480	47.3	6.0
5	4.63	380	100	4.5
10	2.99	300	100	1.0
15	2.81	250	100	1.0
20	1.79	180	100	1.0

(3) 各種溶融スラグ混入混合物の耐水性

溶融スラグの種類と混入量を変化させたアスファルト混合物の水浸ホイールトラッキング試験を行った。試験には、Cu スラグ２試料、Fe-Ni スラグ１試料、一般ゴミ溶融スラグ２試料、下水汚泥溶融スラグ１試料と、比較材の天然砂を使用した。アスファルト混合物は密粒度

(最大粒径 13mm)とし、骨材粒度が容積ベースで同一となるように骨材配合を設定し、各条件について最適アスファルト量を求めて供試体を作成した。

試験結果を図-6 に示す。Cu スラグについては、細骨材として使用しても比較材と同程度のはく離抵抗性を有すると考えられるが、その他のスラグ材料は、混入率が増えるとはく離率が大きくなる傾向にあり、溶融スラグ混入率の増加に伴い舗装混合物の耐水性は低下するものと推察される。この影響が実際の舗装寿命にどのような影響を及ぼすのか、検討を続ける必要がある。

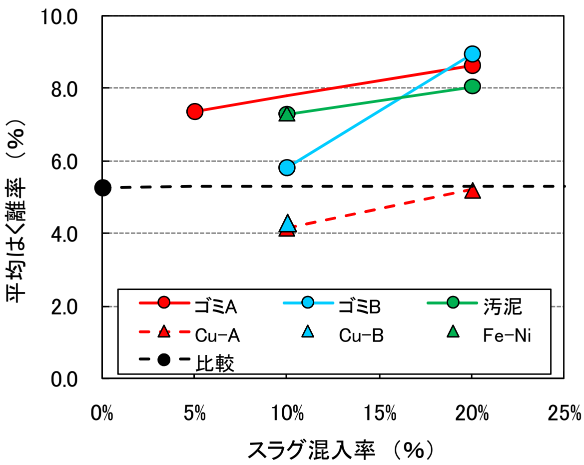

図-6　水浸ホイールトラッキング試験結果

３．３　非鉄スラグの促進耐久性試験

舗装への利用が検討されている非鉄スラグとして、Cu スラグ、Fe-Ni スラグを取り上げ、土木研究所内の舗装走行実験場で耐久性試験を行った。試験舗装工区の概要を表-4 に示す。なお、耐久性試験は、平成 17 年度に比較工区を含めた 3 工区で開始したが、Cu スラグ-1 工区のわだち掘れが早期に進行したため、Cu スラグ-1 工区を粒子形状や表面性状を改良した銅スラグを用いた Cu スラグ-2 工区として改修して試験を継続している。

わだち掘れの変化を、図-7 に示す。Fe-Ni スラグ混入舗装は、比較工区よりもやや優れた塑性変形抵抗性を示している。Cu スラグ混入舗装は、当初の材料はわだち掘れ抵抗性に劣っていたものの、粒子の形状等を改良することにより、比較工区の密粒度舗装と同程度の塑性変形抵抗性を長期間にわたり確保できることがわかった。

また、非鉄スラグは、金属等の表面研削用の粒子として使用され非常に硬いものであり、耐摩耗性やすべり抵抗の改善に寄与することが期待された。すべり抵抗値の変化を図-8 に示すが、施工時期ごとに比較工区とほぼ同じ値を示しており、比較工区に使用した天然砂と同程度の性能であると言える。

表-4　非鉄金属スラグの促進耐久性試験工区

工区	表層の仕様	走行試験
Fe-Ni 工区	再生密粒度 As 舗装(20) Fe-Ni スラグ 10%混入	H17.6 施工 120 万輪経過
比較-1	再生密粒度 As 舗装(20)	H17.6 施工 120 万輪経過
Cu 工区	再生密粒度 As 舗装(20) Cu スラグ改良型 10%混入	H18.6 施工 80 万輪経過
比較-2	再生密粒度 As 舗装(20)	H18.6 施工 80 万輪経過

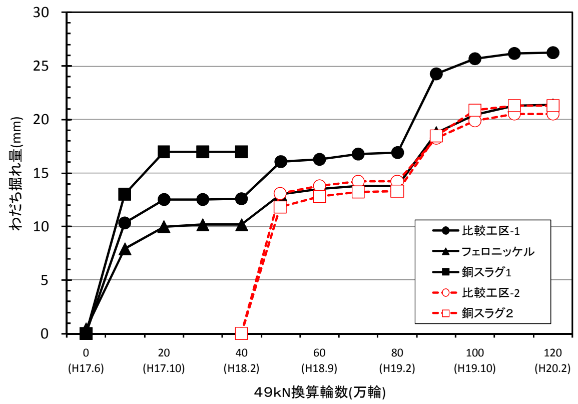

図-7　わだち掘れ量測定結果

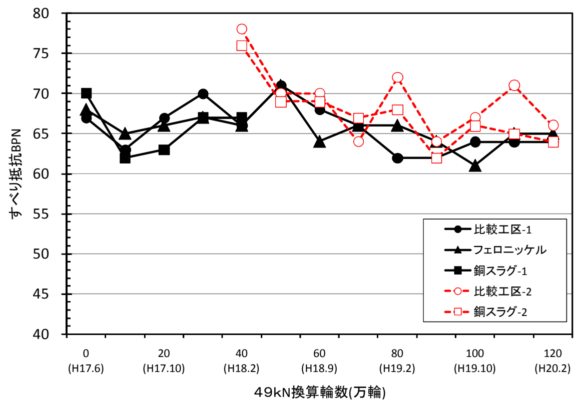

図-8　すべり抵抗測定結果

なお、路面の快適性を示す平たん性や舗装の支持力評価としての FWD たわみ量なども、比較工区と同様な経過を示している。

これらの結果から、非鉄スラグを加熱アスファルト混合物の細骨材として利用する場合においては、従来材料と同程度の路面性状や耐久性を期待できることがわかった。

４．地域内舗装ストックへの再生資材蓄積量の推定

４．１　検討の概要

舗装分野では、アスファルト塊の再利用のための技術開発が昭和40年代後半から50年代にかけて活発に行われた。その成果として昭和 59 年には「舗装廃材再生利用技術指針(案)」が(社)日本道路協会によりまとめられ、以降、再生利用技術に関する種々の技術図書の発刊により舗装分野での再生利用技術の普及が図られてきた。その結果、アスファルト塊の再生利用は、現在では一般化し、アスファルト舗装材料は繰り返し再生して使用することが前提となっている。このため、舗装用材料として他産業再生資材等を継続的に使用した場合、通常のアスファルト舗装材料と同様に再生利用されることとなり、場合によっては、更新の度に他産業再生資材が添加され、舗装発生材中の濃度が高くなることも考えられることから、その影響を定量的に把握するための推定を行った。

溶融スラグは、珪酸等が溶融したガラス質の材料であるため、舗装の耐久性として水浸時のはく離破壊が特に懸念される。

アスファルト舗装に、長期的に再生資材がどの程度蓄積され、蓄積された結果、舗装寿命にどのような影響を及ぼすのか、できるだけ定量的に把握することを目的として、マテリアルフローを考慮した再生アスファルト等の資材の移動と蓄積の分析を試みた。アスファルト舗装のストック量に対して出入りする材料のフローをモデル化し、特定地域内のアスファルト舗装材の更新挙動を定量化するために、図-9 に示すモデルを設定した。

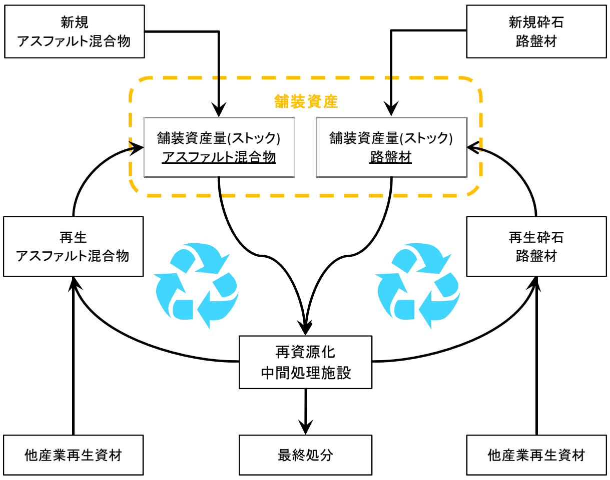

図-9　アスファルト舗装材のマテリアルフロー

３．２　推計モデル

はじめに、注目する地域内の各年の舗装ストック量を算定してこのモデルの基本データとし、さらに各種統計資料から得た資材移動量を入力することにより、地域内の舗装総量に占める各年の再生材の蓄積量や発生量を算定することとした。この分析から、舗装アスファルト混合物への特定再生資材の蓄積量、すなわち地域内のアスファルト舗装材に占める混入比率を推定した。

舗装ストック量の算定は、主に道路統計年報から得た道路面積や事業量（新設/修繕）に、交通量ごとの舗装構造から対象地域内の舗装資産量を算出した。具体的には、交通量区分ごとに代表的な舗装構造厚さを仮定し、区分ごとの舗装面積からアスファルト舗装材の総量を求めた。

舗装材の資源循環のフローでは、修繕工事等により発生したアスファルト舗装材は、すべて舗装や路盤等に再利用されるか最終処分されるものとし、中間処理施設等の在庫は便宜上毎年ゼロとなるように収支計算した。

４．２　再生資材蓄積の推計結果

溶融スラグ等の他産業再生資材が骨材の一部として使用される場合、運搬コストや域外移動の制約から発生地域周辺で用いられることが多い。このため、今回の試算では、資材の利用を推進している典型的な事例から、表-5 に示す資材と道路地域の組み合わせとした。

表-5　推計を行った再生資材と道路地域

再生資材	Fe-Ni スラグ	石炭灰	エコスラグ	鉄鋼スラグ
道路地域	全京都府 京都府 (京都市を除く)	全国	千葉市	全千葉県

Fe-Ni スラグをその生産地である京都府北部に使用した事例の推計結果が図-10 である。各年に使用されるスラグ量は必ずしも多くないものの、舗装が定期的に更新されるとともに、アスファルト舗装材が再生利用されることから、細骨材として舗装に蓄積するスラグ材料の割合は無視できないことがわかる。将来推計については、舗装事業量やスラグの利用量は仮定であるものの、10 年後にはアスファルト混合物の約 1 割がスラグで置き換えられる可能性があることがわかった。

図-11 は、ゴミ焼却灰溶融スラグの利用を積極的に進めている千葉市の事例である。舗装ストックへの当該再生資材の蓄積量は無視できない率ではあるものの、現時点ではそれほど大きなものではない。これは、スラグの本格的な使用開始が比較的最近であること、使用対象地域の道路資産量の規模等によるものと思われる。

アスファルト舗装発生材にどのような再生素材が混入しているのかを管理することは事実上不可能である。再生資材の種類によっては、こうした舗装材への累積混入

率を考慮しLCC検討を行うことも必要である。

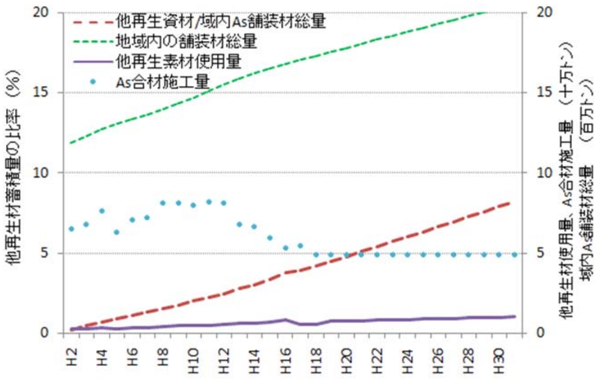

図-10　アスファルト舗装の再生資材の蓄積量推計
(Fe-Ni スラグ／京都府(京都市を除く)

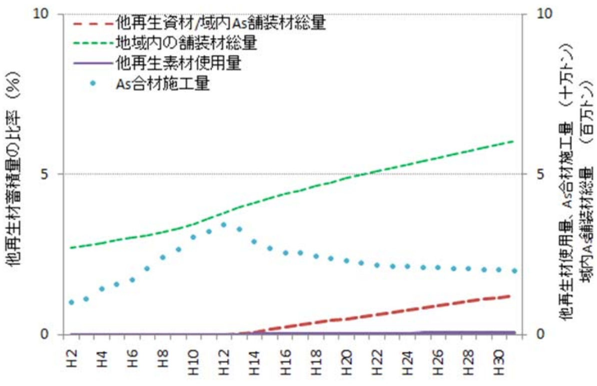

図-11　アスファルト舗装の再生資材の蓄積量推計
(ゴミ焼却灰溶融スラグ／千葉市)

５．他産業再生資材の利用によるコストへの影響評価

５．１　検討の概要

新たに再生材料を適用する場合、排出される資材を処分せず再生利用することの便益と、これを使用することにより舗装の整備管理にかかる費用の変化をよく勘案して、社会全体の視点から費用便益評価を行って判断することが重要である。

使用者側のコスト分析においては、舗装の耐久性、すなわち供用寿命から決まる更新サイクルの影響が大きいが、その他に、製造施工時の初期コスト、維持管理及び再リサイクル時のコストも無視できない。

(1)施工までの初期コスト

・材料コスト：天然骨材を他産業再生資材に置き換えた場合の材料単価（骨材購入価格差）

・合材工場設備コスト：他産業再生資材混入混合物製造のために新規に設備を増設した場合価格に転嫁される費用（年間予定出荷数量と償却年数により変化）

・品質保証コスト：他産業再生資材混入舗装の環境安全性を合材工場で確認する場合の費用（スラグ入荷時や合材出荷時の品質管理試験）

(2)維持管理及び再リサイクル時のコスト

・維持管理コスト：環境モニタリング費用、特に必要となる点検項目とその費用、維持修繕費など

・再生利用コスト：他産業再生資材混入舗装の再生利用のための費用、廃棄時の処分費など

上記以外にも、配合試験費用、混合物事前審査費用、新規設備に係わる土地代や電気代、研修費、資材認知度向上のための広報費など、一般管理費まで範囲を広げると資材適用のためのコスト要素は多い。

今回の試算では、材料費、新規設備費、品質保証費など製造施工時のコスト増減と再生資材の混入により耐久性が低下した場合の維持管理コストの算出を試みた。なお、ここでは他産業再生資材の中から溶融スラグを取り上げた。

５．２　製造に関する初期コスト

溶融スラグ混入混合物は、溶融スラグを入手できればほとんどのアスファルト合材工場で製造することが可能である。しかしながら、材料費は地域ごとに異なり、また注文に応じて出荷するためには材料保管や混入等のための設備が必要となる。そこで、合材工場の設備などを勘案して出荷量ごとに条件設定しコスト算定した。合材工場を、都市（東京・千葉・神奈川・埼玉）と郊外（栃木・群馬・茨城）に大別し、さらに骨材貯蔵形式として骨材サイロの有無に分けて４パターン設定し、表-6 に示す合材工場を選定した。この工場ごとに施設設備や資材や製造単価等のコストを調査して試算し、その平均値を求めて評価に使用した。

表-6　コスト評価において設定した合材工場

地域 関東地区		都市部		郊外部	
		東京・千葉 神奈川・埼玉		栃木・群馬・茨城	
合材工場名		工場A	工場B	工場C	工場D
骨材貯蔵形式		骨材 サイロ	ストック ヤード	骨材 サイロ	ストック ヤード
出荷能力	新　規	120t/h	60t/h	120t/h	120t/h
	再　生	60t/h	60t/h	60t/h	60t/h
	総出荷能力	180t/h	120t/h	180t/h	160t/h
合材サイロ		100t ×2 基	120t +100t	150t ×2 基	なし

施工歩掛については、選定した合材工場の比較的近隣で施工が行われた場合を想定して、標準混合物を用いた施工コストについて試算した。各単価は、(財)建設物価

調査会発行の土木工事積算基準マニュアル平成 18 年度版（積算基準マニュアル）ならびに建設物価 2007 年 3 月（物価版）を参考に設定した。施工条件は、東京地区における積算基準マニュアルにおける幅員 3m 以上の道路を対象とした。施工費用以外の安全費、輸送費等は試算の対象から除外した。

(1)材料コスト

溶融スラグは廃棄物処理工程などの副産物であるが、その製造コストはほぼ全てが主製品や廃棄物処理費に転嫁されている。このため、溶融加工骨材であるにもかかわらず、天然骨材と比較すると一般に安価である。アスファルト混合物製造のために市場ですでに取引されているが、その販売形態はほとんどが溶融スラグ製造工場置場車上渡しである。溶融スラグ製造工場から合材工場までを同一自治体とするとその近距離運賃は一般に 1,000～1,500 円/t と考えられる。溶融スラグ売却単価を調査し 10 箇所の設定単価の平均値を求めたところ 1,280 円/t であった。その他の使用材料の単価は、各工場の地域ごとに物価版を参考に設定した。

アスファルト混合物 1t 当たりの材料費を、もっとも代表的な混合物である密粒度混合物(13)を用いて計算し 4 工場の平均値を求め、さらに施工歩掛により標準単価に換算したところ、図-12 の通りとなった。なお、アスファルト混合物の配合は上記 2.3 項のものを適用し、アスファルト量は 2.2 項の調査における報告値をもとに溶融スラグ混入率ごとに設定した。

溶融スラグ混入率の増加に伴い材料費に係る施工単価は低下する。これは、相対的に安価な溶融スラグで粗砂が代替されること、また最適アスファルト量が減ることによるアスファルトの原価低減効果が大きい。なお、溶融スラグの細粒分を補うために細砂及び石粉使用量は若干増加する。

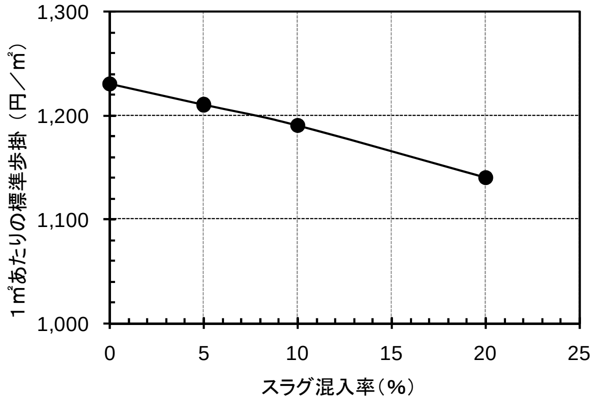

図-12　溶融スラグ混入率と標準歩掛(材料費のみ考慮)

(2)合材工場設備コスト

溶融スラグ混入混合物を定常的に出荷することとなる場合、合材工場では新たな設備投資が必要となる場合がある。そこで、溶融スラグ混入混合物を出荷するために新規設備を導入した場合の費用を含めた製造コストを算出した。

溶融スラグは、1 日当たりの産出量は少なく、年間を通してほぼ一定に生産されるが、貯蔵設備を持つ製造施設は少ない。一方、合材出荷量は時期的に一定ではなく、一時期に大量に使用する場合もある。したがって、溶融スラグ混入混合物を出荷する体制を整えるためには、一定の頻度で溶融スラグを受け入れて保管しておく必要がある。そこで、溶融スラグを継続的に納入し年間の合材出荷実績量の変化にあわせて出荷する場合に必要となる、溶融スラグ等の貯蔵ヤードの規模及び費用を、選定した合材工場毎に算出した。

必要となる新規設備としては、材料貯蔵施設のほか、ホッパやベルコンなどの投入設備、操作盤の改造などが挙げられる。

溶融スラグ混入混合物の単価に新規設備費用を加えたコストの算出にあたり、設備の償却年数は 5 年の均等割とし、溶融スラグ混入混合物の年間出荷トン数に新規設備費用計上分を転嫁した場合のコストとして算出した。

合材工場の新規設備費と材料費を算入した施工歩掛の試算結果を図-13 に示す。設備費用を考慮すると、材料費が低減されても溶融スラグ混入混合物の年間予定出荷数量が少なくとも 5,000ton 程度以上確保できないと、標準歩掛に対するコスト低減にはいたらないことがわかった。

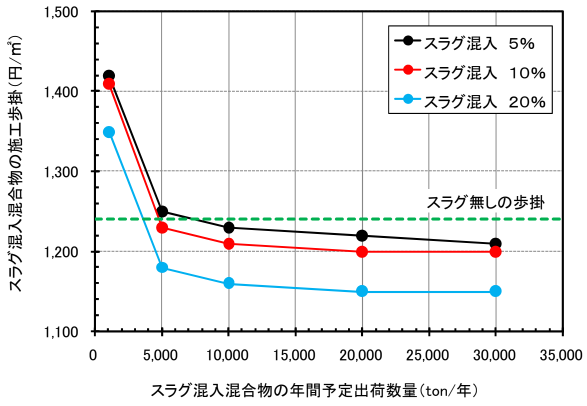

図-13　溶融スラグ混入率及び出荷量と標準歩掛
（材料費＋設備費を考慮）

５．３　維持管理コスト

室内試験の結果から、溶融スラグを使用した場合には、

耐流動性や耐水性が低下する傾向が確認されている。このことから、他産業再生資材を使用した場合に、耐流動性や疲労抵抗性が低下するものと仮定し、わだち掘れが基準に達した時点で維持や修繕を行うものとして耐久性の低下率を変化させLCCを試算した。試算条件を表-7、設定した舗装のライフサイクルを図-14に示す。

表-7　LCCの試算条件

項目		設定値	備考
動的安定度(DS)		1500，1350，1200	DS:-10%，-20%
わだち推定式		変数 ・供用機関 ・大型車交通量 ・動的安定度　等	舗装設計便覧 式4.4.1を変形
切削工実施目安		わだち掘れ30mm	
切削OL工実施目安		わだち掘れ30mm	切削工後30mmに達した時点で実施
補修費用	切削工	800円/m²	コブ取り
	切削OL工	1500円/m²	表層のみ
	打換え工	5000円/m²	路盤から打換え

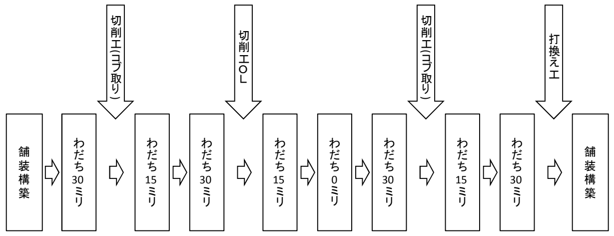

図-14　設定した舗装のライフサイクル

試算した結果を図-15に示す。図から、舗装のライフサイクルは、標準(DS=1500)の場合が、32年であるのに対し、動的安定度が10%低下した場合(DS=1350)には26年、20%低下した場合(DS=1200)には21年となり、解析期間50年の累積費用は、標準を1とした場合に、動的安定度が10%低下した場合は約1.2、20%低下した場合は約1.6となった（なお、ここでの累積費用は、ライフサイクルの最小公倍数が8736年となり現実的ではないことから、便宜上、図中の一次回帰式により算出した）。また、疲労抵抗性が低下した場合のシミュレーションでも同様な傾向が得られた。このことから、耐久性を考慮した上で他産業再生資材を利用することが非常に重要であることがわかった。

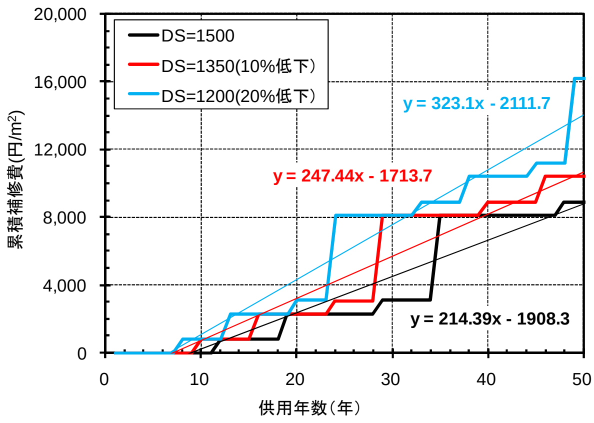

図-15　ライフサイクルコスト試算結果

６．溶融スラグ等の舗装用素材としての品質評価項目

溶融スラグ等の他産業再生資材は、試行的に使用が拡大しているが、その使用可否の判断において、天然骨材等を前提とする既存規格で定められた材料試験項目のみを見て、舗装素材としての適性を判断する傾向がある。たとえば、「品質規格を満たす」、「既存材料と同等」など、従来材料のための品質規格を根拠に照査する場合が多い。

しかしながら、これらの既存規格の指標は、従来材料を想定した最低限必要な基準項目に過ぎず、今後活用したい新材料を想定して設定されたものではない。たとえば水浸膨張や花咲現象など、従来の材料では求められない（正確には必要ないので省略されている）性状項目は多い。つまり、現行規格を満足すれば舗装用素材として全て問題ないという十分条件ではなく、新しい材料の採用に当たり、その特徴に応じた基準項目を必要条件として設定しなければならない。

このような品質評価項目の不整合は、舗装材料の利用者側の品質規格体系が、依然として天然材等の既存材料を前提とした「仕様規定」であることから生じるものと考えられる。舗装を構成する素材の品質指標は、その材料が利用される混合物、構成層、ひいては舗装全体に要求される性能をもとに「性能規定」として設定されるべきであるが、現時点で舗装用素材の品質規定がこれに対応できているわけではない。

他産業再生資材の舗装での利用に関する既往の文献調査の結果から、他産業再生資材の種類ごと、および利用用途(アスファルト混合物や路盤材など)ごとに耐久性等を含めた性能項目が異なることが知られている。この事から、他産業再生資材の品質確認項目は、素材の化学的・物理的性状を勘案し、素材の種類ごと、および利用用途ごとに体系化していく必要がある。

７．まとめ

研究の結果、以下のことがわかった。

・廃タイヤや廃プラスチックは、加熱により団粒化や減容化を起こすとともに、異臭が発生するため、利用する場合には対策が必要である
・廃タイヤを細骨材として混入したアスファルト混合物は、廃タイヤの混入量が多くなるに従って、耐流動性、耐水性が低下する。
・溶融スラグを細骨材として混入したアスファルト混合物は、スラグの混入量が多くなるに従って、耐水性が低下する傾向がある。
・舗装走行実験場での非鉄金属スラグ混入舗装の耐久性試験では、非鉄金属溶融スラグを細骨材として利用する場合においては、従来材料と同程度の路面性状や耐久性を期待できることがわかった。
・溶融スラグ等の再生資材を使用するために必要となる様々な費用を算定した結果、材料費は低下するものの、設備投資費等の増加により、プラント出荷量などによってはコストが上昇することがわかった。
・繰り返し再生利用システムが確立している舗装材に溶融スラグ等を混入した場合の舗装への蓄積状況を推定したところ、使用量と対象地域の規模によっては、蓄積量は無視できないものになる。このことから、混入率の増加が舗装の性能に影響を与える材料については累積混入量が増加しすぎないよう対策が必要である。

再生資材の適切な有効利用のためには、資源リサイクルを社会全体の視点から捉え、資源を廃棄しないことや天然資源の使用を抑制できることなどによる環境面での便益(例えば、ライフサイクルアセスメントなど)と再生利用のための費用(再生資材の単価、設備投資費用、耐久性などを考慮した維持管理費用など)を比較評価して総合的に判断することが求められる。

環境面での便益については、ライフサイクルアセスメントの概念が多方面で検討されているが、特に舗装を含めた土木分野においては活用に至っていないのが現状である。また、LCC分析では、舗装の耐久性、すなわち供用寿命から決まる更新サイクルの影響が大きいが、現時点では使用材料の物理的性状と耐久性の関係について定量的な評価が現状では困難な状況である。

今後は、ライスサイクルアセスメントなどの環境面や舗装の供用性や再リサイクルに関するコスト評価についてのデータを蓄積した上で、様々な再生資材の適用性について総合的な検討を続けていく必要がある。

A STUDY ON THE APPLICABILITY OF MELT-SOLIDIFIED SLAG TO PAVEMENT MATERIALS

Abstract : Recently, recycled materials including melt-solidified slag has been increasing due to exhaustion of final disposal sites. Particularly, waste producing industries other than the road sector have been developing recycled materials as pavement material increasingly. These recycled materials from other industries can contribute to recycle use for waste, but it is not clear that these materials can contribute reducing the effects on the environment throughout a lifecycle in total.

In this study, we investigated industry reproduction material used in the field of the paved road, and durability of waste tire, waste plastic and melt-solidified slag as recycled pavement materials was examined by laboratory and accelerated loading test in the pavement test field. As a result, when it used other industry reproduction material, it became clear that I could secure the durability at the same level as material for normal pavement by considering quantity of mixture or a manufacturing method of the other industry reproduction material.

We estimated the accumulation situation of reproduction materials when the asphalt mixture which other industry reproduction material was mixed in was recycled repeatedly, and we calculated about the life cycle cost (LCC) when the durability of the asphalt mixture deteriorated. As a result, when we use other industry reproduction material, we understood that we could secure the durability at the same level as material for normal pavement by considering quantity of mixture. In addition, accumulation amount in pavement materials of the road infrastructure stock were estimated by calculation of a material flow analysis focusing on asphalt pavement recycling systems. When the durability of the reproduction asphalt mixture deteriorated, the LCC is increased.

Key words : recycle, nonferrous metal slag , melt-solidified slag, waste tire, waste plastic, durability, LCC