

II-3 溶融スラグ等の舗装への適用性評価に関する研究

研究予算：運営交付金（一般勘定）

研究期間：平 17～平 20

担当チーム：材料地盤研究グループ（新材料）

研究担当者：西崎到、新田弘之

【要旨】

近年、資源の有効活用、最終処分場の枯渇などを背景として、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、中でも舗装用として他産業からの再生資材の開発が発生者を中心に多くなっている。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低減に寄与しているかが不明なのが現状である。

そこで、本研究では、溶融スラグ等の舗装への適用性の評価方法を作成し、舗装での LCA を行う場合に便利な環境負荷量の算定プログラムを作成した。また、舗装資材の環境影響評価する場合に必要な環境条件を整理し、一部は計測なども行った。また、非鉄金属スラグ、ゴミ溶融スラグ、廃プラスチック、廃タイヤを取り上げ、これらの再生資材の舗装への適用性について上記評価法を用いて評価を実施し、結果を取りまとめた。

キーワード：アスファルト、舗装、リサイクル、溶融スラグ、廃タイヤ、廃プラスチック、LCA

1. はじめに

近年、資源の有効活用、最終処分場の枯渇などを背景として、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、中でも他産業の廃棄物発生者による舗装用再生資材の開発事例が多くなっている。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全過程を考慮した場合でも環境負荷低減に寄与しているかが不明なのが現状である。これを解明するには、LCA（ライフサイクルアセスメント）分析が有効であるが、舗装用途に使用する資材や、再生資材では原単位が整備されていないものが多く、これを整備して解析する必要がある。また、再生資材を利用する際には環境安全性に配慮する必要があるが、舗装へ利用する場合の環境条件が明らかではなく、どのような環境に対して安全性を配慮する必要があるのか明確にする必要もある。

本研究では、溶融スラグ等の舗装への適用性の評価方法を作成し、舗装での LCA を行う場合に便利な環境負荷量の算定プログラムを作成した。また、舗装資材の環境影響評価する場合に必要な環境条件を整理し、一部は計測なども行った。

また、非鉄金属スラグ、ゴミ溶融スラグ、廃プラスチック、廃タイヤを取り上げ、これらの再生資材の舗装への適用性について上記評価法を用いて評価を実施し、結果を取りまとめた。

2. 適用性の評価方法

2. 1 LCA による舗装への適用性評価方法

2.1.1 概要

図-1 に LCA の概念図を示す。LCA では、製品のライフサイクルを通じた天然資源やエネルギーなどの INPUT とそれぞれの環境への排出物などの OUTPUT を求め、それをもとに様々な環境影響についてとりまとめ、評価を行うものである。

LCA についてはすでに ISO 化されており、ISO を基にした JIS Q14040 シリーズも公表されている。ただし、こ

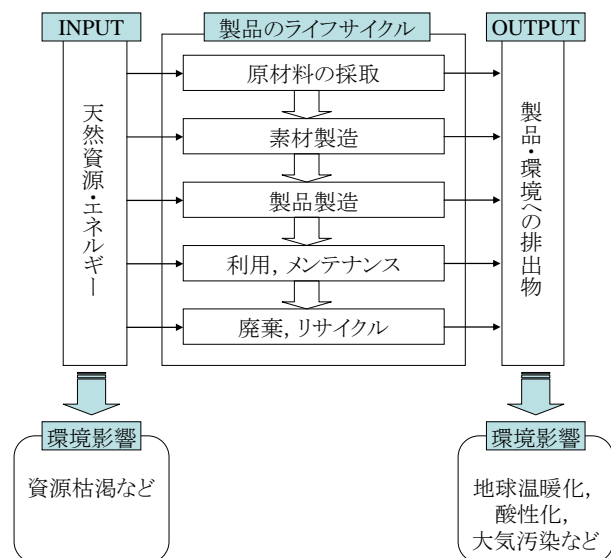


図-1 LCA の概念

れを見ても数値的なものは示されておらず、舗装を対象に LCA を行うためには、様々な条件設定や基礎データの作成など行わないと実施できない。

2.1.2 LCA の一般的な構成・手順

LCA の構成は、一般的には図-2 に示すような、①目的および調査範囲の設定、②インベントリ分析、③環境影響評価、④結果の解釈、からなる。これらの評価結果は、通常、製品の開発や改善、戦略立案などに使用される。

①目的および調査範囲の設定により、まず目的と対象とする範囲を明確にする。LCA は、目的や調査範囲の設定により様々な表現が出来るため、設定は適切に行う。
 ②インベントリ分析（インベントリ：目録 鉄鉱石や原油などの投入量やCO₂等の排出量といった入出力情報のリストを指す）では、製品のライフサイクルを構成する全ての単位プロセスについて、資源・エネルギーの投入量、環境への排出物の量の目録を作成する。信頼性を保つために、用いたデータの根拠や出典などは明示する。
 ③環境影響評価では、インベントリ分析で得られた各データを特定の環境影響と関連づけて、それらの影響を理解する。場合によっては、インベントリデータをそれぞれの影響領域に分類化して、特性化係数を用いて共通単位にして集計したり、さらに複数の影響領域で特性化したものを統合化したりする。なお、特性化係数や統合化係数は、国内外で開発が行われ、わが国においてはLIME係数というものが提案されている。
 ④結果の解釈では、インベントリ分析、影響評価の結果について、目的を踏まえた解釈を行う。

2.1.3 本研究における舗装LCAの手順

(1) 目的および調査範囲の設定

本研究の目的は、溶融スラグ等のリサイクル材を舗装へ利用した場合の環境的なメリットを把握することにある。標準的な調査範囲としては、国内で一般的に使用された場合を想定し、国内の都市の平均値を求め、この数値を持つモデル空間を設定するとともに、資材等の発生源のうちどこまでを評価対象とするかを設定した。また、舗装面積と舗装寿命を設定し、これより基本的な舗装資材の需要も設定した。

(2) インベントリ分析

インベントリ分析では、標準的な舗装での資材消費の算定、リサイクル材利用舗装での資源消費の算定を行い、これをもとに環境負荷の算定を行った。

資源消費は、標準的な舗装におけるものを基本とし、リサイクル材を利用する場合は、添加量など文献やヒアリング調査によって求めた。

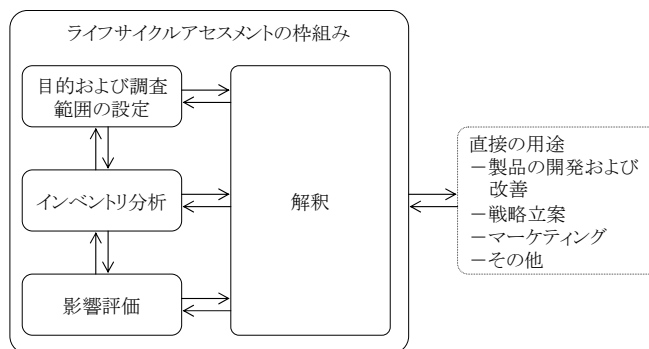


図-2 LCA の構成段階 (JIS Q14040)

環境負荷の算定に当たっては、環境負荷原単位が必要となる。舗装関係では、算定に必要な公表された原単位はほとんどない。また本研究で対象としている溶融スラグ等のリサイクル材については原単位もまたその元となる生産のための情報もほとんどない。したがって、LCA の実施に当たってまず原単位作成から実施する。原単位の作成方法には、一般的に積み上げ法と産業連関法があり、さらにこれらを組み合わせたハイブリッド法もある。本研究においては、リサイクル材には必ずしも価格があるわけではなく産業連関法の適用が難しいこと、舗装分野では、他分野と比べて比較的材料的の種類が少ないことなどを考慮して、できるだけ積み上げ法で原単位を作成することにした。原単位作成に当たっては、国内での平均的な値を作成することにし、国内統計データをできるだけ活用することとし、これが利用できない場合は、ヒアリング調査を行った。

(3) 環境影響評価

環境影響評価は、LIME 係数を用いて各指標を統合化して評価した。

(4) 結果の解釈

算定結果、統合化評価を踏まえ、適用性について検討した。

2.1.4 舗装用環境負荷算定プログラム

舗装用の環境負荷算定プログラムを作成した。図-3 に入力画面の一部を示す。舗装で使用される資材、燃料等についてはプルダウンメニューで選択できるようにしており、それぞれの原単位も選択と同時に入力される仕組みとなっている。新たな資材等も追加で入力できるようにしており、計算ボタンを押せば計算が実行されるようにしてある。

なお、リサイクル材については、製造方法が一律ではなく、共通の型式が見いだせないことから、原単位の作成が別途必要になる。



図-3 舗装LCA計算プログラムのイメージ

2. 2 評価にあたり考慮すべき環境条件の検討

2.2.1 文献による環境条件の整理

舗装資材の貯蔵や製造、施工、供用中などさまざまなシーンにおける環境条件について、これまでの文献などをもとに整理した。アスファルト混合物層と路盤材で大き

表-1 アスファルト混合物（主に表層）に使用される材料の貯蔵から廃棄までの行程における環境条件

ライフ	分類	アスファルト混合物		まとめ
		雨水が浸透しない場合	雨水が浸透する場合 排水性舗装 透水性舗装	
貯蔵時	水質	ヤードにおける雨水等による溶出物質の地盤等への浸透	通常、ストックヤード底部に水抜き(排水処理)を設けており、地盤深部への雨水の浸透は少ない	
	大気	ヤードにおける風等による粉塵の大気中への飛散	粉塵の飛散防止のため、プラントの周囲を囲んだり、サイロ方式の貯蔵による対策を取っている。	
製造時	水質	回収ダストからの雨水等による溶出物質の地盤等への浸透	回収ダストは集塵機あるいは貯蔵槽に回収されるため、プラントから発生するダストは少量であり、地盤等への浸透する量は少ない	
	大気	加熱による揮発成分の大気中への飛散 粉塵の大気中への飛散 回収ダストの大気中への飛散	・加熱によるアスファルトの揮発成分の蒸発が周囲に影響を与えることはほとんどない。 ・ドライヤで発生する粉塵は、集塵機により大気放出ガス中の煤塵濃度を規制値の10分の1まで低下させており、飛散の影響は少ない。 ・回収ダストは集塵機あるいは沈降槽により回収されるため、大気中へ飛散する量は少ない。	
運搬時	水質	—	—	
	大気	加熱による揮発成分の大気中への飛散(ただし、可能性は低い)	通常、シートによる保温を行っているため、揮発成分の大気中への飛散は少量であり、周囲への影響はほとんどない。	
施工時	水質	—	—	
	大気	加熱による揮発成分の大気中への飛散(ただし、可能性は低い)	熱の発散や揮発成分の蒸発があるが、周囲に与える影響は少ない。	
その他	水質	転圧時の骨材の細粒化	上層路盤に用いる砕石はすり減り量が規定されており、ローラー転圧時に極端な細粒化は起こらないと考えられる。ただし、下層路盤に石炭灰(クリンカッシュ)を使用したケースでは、ローラー転圧により粗粒部分が細粒化している例がある。	
	水質	雨水等による溶出物質の下水・河川等への流出	雨水等による溶出物質の地盤等への浸透	建設廃材や他産業再生資材を使用している場合には、ラベリング等摩擦によるアスファルト舗装の細粒化は降雨によりウダが状となり、下水・河川等への流出水の質の影響が懸念される。また、路盤に雨水が浸透する場合、路盤材と同様に、路盤層での雨水の耐水時間が長くなるため、路盤材の溶出水についても水質の影響が懸念されることから、「環境庁告示第46号」に基づく環境安全性の確認が必要である。
供用時	水質	ポリッシング、ラベリング等摩擦による粉塵の大気中への飛散	一般のアスファルト舗装の摩耗量は、1.8cm ² /yr、摩耗深さは0.6mm程度である(国道27号)。排水性舗装の摩耗量は10.2~20.4cm ² /yr(ただし、摩耗量20.4cm ² はタイヤチェーン装着時)、摩耗深さは1~2mm程度である(国道49号)。また、摩耗による粉塵は、細かいもので0.074mm通過量が20%程度、粗いもので10%程度である。	
	大気	交通荷重によるアスファルト皮膜のはがれ(骨材の露出) 交通荷重による骨材の飛散	一般のアスファルト舗装については、調査事例が少ない。他産業再生資材のガラス入りアスファルト混合物では、舗装路面に露出しているガラスが若干飛散している。あるいはアスファルト入りアスファルト混合物で細粒化(砂分)の飛散が見られ、路面が粗くなるケースがある。	
再生時	水質	掘削時の散水等による溶出物質の下水・河川・地盤等への流出 ヤードにおける雨水等による溶出	掘削時に発生する粉塵の大気中への飛散	掘削時の散水等による溶出物質の地盤等への浸透(ただし、可能性は低い)
	大気	掘削時に発生する粉塵の大気中への飛散	掘削時に発生する粉塵の大気中への飛散	ヤードにおける風等による粉塵の大気中への飛散
廃棄	水質	処分場における雨水等による溶出物質の地盤等への浸透	通常、処分場は泥水が地下へ浸透しないように不平等水性の粘性土やコンクリート等で遮水している。	
	大気	処分場における風等による粉塵の大気中への飛散	廃材が乾燥状態にあるときは、適宜散水するため、周辺に影響を与える粉塵の飛散はほとんどない。	

く異なる部分があるので、それぞれ別に整理して表-1、2に示す。

表-1 ではアスファルト混合物層に利用する際に環境的配慮が必要なものをまとめているが、製造時に高温にさらされるため、これによる性状変化などがないことが必要である。また、供用中には交通により、ポリッシング、ラベリングを受けることもあるため、微細な粒子になった場合にも配慮が必要である。さらに再生時にまた過熱されるので、その際の熱への対応も必要である。

表-2 では路盤として利用する際の環境的配慮事項をまとめているが、路盤まで雨水が浸透する場合は、特に溶出物質への配慮が必要である。路盤まで雨水が浸透しない場合は、水に接触することが少ないと思われるが、これを確認したデータは見受けられなかった。

2.2.2 舗装内の水分移動の観測

舗装内での水分移動について文献から知見を得ることができなかったため、土木研究所内でこれを観測した。観測方法としては、表層(密粒)5cm、路盤(粒状)15cm、幅員3mの舗装の中央地点で、深さ方向0.1、0.2、0.5、

表-2 路盤材に使用される材料の貯蔵から廃棄までの行程における環境条件

ライフ	分類	路盤材料		まとめ
		路盤に雨水が浸透しない場合	路盤に雨水が浸透する場合(透水性舗装)	
貯蔵時	水質	ヤードにおける雨水等による溶出物質の地盤等への浸透	通常、ストックヤード底部に水抜き(排水処理)を設けており、地盤深部への雨水の浸透は少ない	
	大気	ヤードにおける風等による粉塵の大気中への飛散	粉塵の飛散防止のため、プラントの周囲を囲んだり、サイロ方式の貯蔵による対策を取っている。	
製造時	水質	—	—	
	大気	粉塵の大気中への飛散(ただし、可能性は低い)	プラントでの路盤材製造時は、スプレーやブランクレー等による散水により粉塵発生を抑えており、大気中への飛散はほとんどない。	
運搬時	水質	—	—	
	大気	粉塵の大気中への飛散(ただし、可能性は低い)	運搬時の粉塵発生は少量であり、大気中への飛散は少ない。(通常、シートで覆っており、粉塵発生はほとんどない)	
施工時	水質	表・基層施工前における雨水等による溶出物質の地盤等への浸透	通常、路盤材を長時間放置しておく(舗装工事はまだない)ため、通常、溶出物質の地盤への浸透や粉塵発生はほとんどない。	
	大気	表・基層施工前における風等による大気中への飛散	—	
その他	水質	転圧時の路盤砕石の細粒化	上層路盤に用いる砕石はすり減り量が規定されており、ローラー転圧時に極端な細粒化は起こらないと考えられる。ただし、下層路盤に石炭灰(クリンカッシュ)を使用したケースでは、ローラー転圧により粗粒部分が細粒化している例がある。	
	水質	同上(ただし、可能性は低い)	雨水等による溶出物質の地盤・下水・河川等への浸透	路盤に雨水が浸透する場合、路盤は表層、基層のアスファルト混合物より、雨水拘束量で1.3~3.0倍、貯留量で1.4~3.0倍と大きいため、その分路盤層での雨水の耐水時間も長くなる。このため、路盤材に建設廃材や他産業再生資材等を使用している場合には、路盤材の溶出水について「環境庁告示第46号」に基づく確認が必要である。
供用時	水質	—	—	
	大気	交通荷重による路盤材の細粒化	通常、市街地の舗装工において路盤の状態を開放する期間は短時間であり、路盤材の品質規格を満足する材料を使用しているため、交通荷重による骨材の細粒化はほとんどないものと考えられる。ただし、他産業再生資材等で軟質材料を路盤材に適用する場合には、品質性状の検証が必要である。	
再生時	水質	掘削時の散水等による溶出物質の地盤等への浸透(ただし、可能性は低い)	掘削時に発生する粉塵の大気中への飛散	掘削時の散水等による溶出物質の地盤等への浸透(ただし、可能性は低い)
	大気	掘削時に発生する粉塵の大気中への飛散	掘削時に発生する粉塵の大気中への飛散	ヤードにおける風等による粉塵の大気中への飛散
廃棄	水質	処分場における雨水等による溶出物質の地盤等への浸透	通常、処分場は泥水が地下へ浸透しないように不平等水性の粘性土やコンクリート等で遮水している。	
	大気	処分場における風等による粉塵の大気中への飛散	廃材が乾燥状態にあるときは、適宜散水するため、周辺に影響を与える粉塵の飛散はほとんどない。	

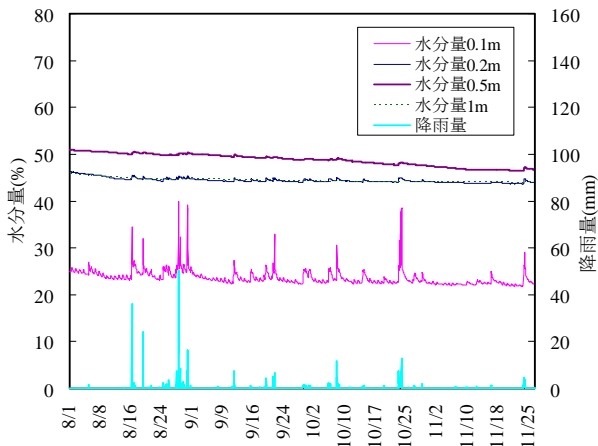


図-4 舗装内水分量の変化

1.0m に土中水分計を設置して観測した。結果を図-4 に示す。降雨とともに表層付近は水分量が変動しているが、これは誘電率の変化により水分量を計測する方法をとっており、このため、表面を流れる水の影響を受けたものと考えられた。その他の層は、降雨によって水分量が鋭敏に変動することはなく、舗装内の水の出入りはほとんどないものと考えられた。これは、舗装内水分の測定例の一つに過ぎないが、通常であれば降雨があっても、表面や側方から舗装内に水が浸入することは少ないものと考えられた。したがって、地下水位が十分に低い箇所の舗装では、路盤内への水の浸入はあまりなく、資材からの溶出はあまり考慮しなくてもよいものと考えられた。

3. 溶融スラグ等利用舗装のライフサイクル評価

溶融スラグ等の再生資材として、非鉄金属スラグ、ゴミ溶融スラグ、廃タイヤ、廃プラスチックを舗装へ利用した場合のライフサイクル評価を行った。評価方法は、2.1.3 にしたがって行った。

3. 1 非鉄金属スラグ利用舗装のライフサイクル評価

3.1.1 概要

非鉄金属スラグとしては、様々な種類が産出されているが、ここでは比較的産出量が多い、フェロニッケルスラグ (Fe-Ni スラグ) と銅スラグ (Cu スラグ) を対象に、砂状のスラグはアスファルト混合物用の細骨材に、石状のスラグ (徐冷スラグ) は路盤材に使用するとして検討した。

3.1.2 評価モデルの設定

(1) 評価モデル

モデル都市空間の条件は、都市部での利用を想定し、表-3 に示すように 14 の政令指定都市 (H17.3 時点) の平均値を用いることとした。

評価モデルを図-5 に示す。①非鉄金属精錬工場から発

生する非鉄金属スラグは、②道路資材として輸送、あるいは③他の資材として輸送され、リサイクルされないものは、④最終処分場に輸送される。⑤資材工場ではスラグまたは砕石 (⑥採石場より供給) を使用して、アスファルトコンクリート (以下、アスコン) および路盤材を生産し、モデル都市に供給する。⑦モデル都市では、供給された舗装材料を用いて道路舗装工事を行うものとした。

ここで、非鉄金属の精錬および既存の非鉄金属スラグのリサイクル利用については、舗装利用の有無に係わらず発生するものであるため、評価対象外とした。

表-3 モデル都市空間

	設定条件
対象面積	570 km ²
道路率	3.1 %
道路面積	17.67 km ²

備考 1) 道路率% = 250.32km² (道路面積合計)

= 8006.87km² (都市面積合計)

備考 2) 道路面積 km² = 570km² (対象面積) × 3.1% (道路率)

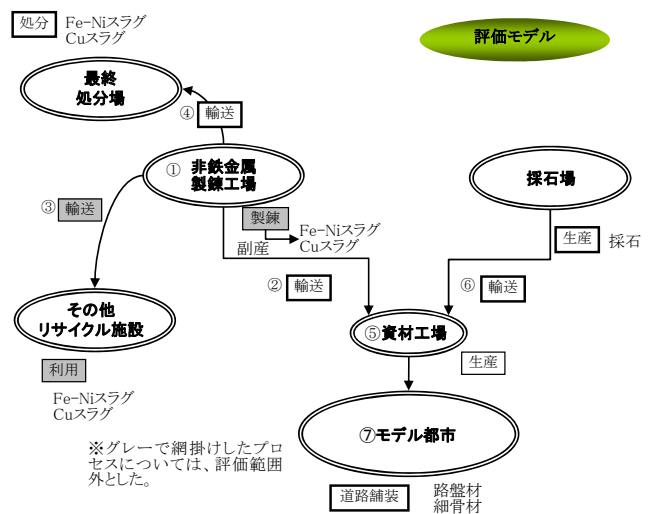


図-5 評価モデル

(2) 舗装資材の需要量

舗装の条件としては、耐用年数を 10 年 (路盤までを打ち換えると仮定)、舗装構造を下層路盤 15cm、上層路盤 15cm、アスファルト混合物層 10cm とした。また、スラグの利用先としては、水砕あるいは風砕によって得られる砂状のものはアスファルト混合物の細骨材として利用、徐冷によって得られた塊状のものを破碎したものを路盤材として利用するものとした。

上記の条件と表-3 から舗装資材の需要量を試算すると、表-4 のようになった。

表-4 舗装資材の需要量

	設定値	単位	備考
年間舗装面積	1,767,000	m ² /年	道路面積 +耐用年数
アスコン需要量	176,700	m ³ /年	年間舗装面積 ×アスコン層厚
路盤材需要量	530,100	m ³ /年	年間舗装面積 ×路盤厚

a) 天然資材の需要量

表-4をもとに、これを確保するために必要な砕石を算出すると、表-5および表-6のようになる。ここで、アスコン密度 2.48t/m³、細骨材配合率 40%、細骨材密度 2.70t/m³、砕石（路盤材）密度 2.70t/m³として計算を行った。

b) 非鉄金属スラグの需要量

非鉄金属スラグの需要量は、天然砕石との置き換え比率によって決まるので、アスファルト混合物利用と路盤材利用の比率をそれぞれ変化させ、5つのパターンを検討することとし、式(1)により算出した。なお、非鉄金属スラグの密度は、表-7の値を用いた。

$$\text{スラグ需要量 (重量)} = \text{砕石需要量} \times \text{置換え比率} \times \text{非鉄金属スラグ密度} \quad (1)$$

表-5 砕石（細骨材用）の需要量

	設定値	単位	備考
アスコン需要量 (容積)	176,700	m ³ /年	表-2 より
アスコン需要量 (重量)	438,216	t/年	アスコン需要量 ×アスコン密度
細骨材需要量 (重量)	175,286	t/年	アスコン需要量 (重量) ×細骨材配合割合
細骨材需要量 (容積)	64,921	m ³ /年	細骨材需要量 (容積) ÷ 細骨材密度

表-6 砕石（路盤材）の需要量

	設定値	単位	備考
路盤材需要量 (容積)	530,100	m ³ /年	表-4 より
路盤材需要量 (重量)	1,431,270	t/年	砕石需要量 (容積) ×砕石密度

表-7 各非鉄金属スラグの特性

	Fe-Ni スラグ	Cu スラグ
密度	3.0t/m ³	3.5t/m ³
スラグの発生割合*	7.3t/t-FeNi	1.9t/t-Cu

※精製金属量に対するスラグ発生量

3.1.3 非鉄金属スラグ生産に係わる資源消費

(1) 資材生産および利用による資源消費の算定

非鉄金属スラグの生産量および生産に伴うスラグ発生量について調査した結果を表-8に示す。

表-8 各非鉄金属の生産およびスラグ発生量(H17年度)

	Fe-Ni	Cu
国内精錬工場数	3	6
国内金属生産量	385,500t/年	1,419,500t/年
国内スラグ発生量	2,819,200t/年	2,657,700t/年
1工場当たり金属生産量	128,500t/年	236,583t/年
1工場当たりスラグ発生量 (重量)	939,733t/年	442,950t/年
1工場当たりスラグ発生量 (容積)	313,244m ³ /年	126,557m ³ /年

(2) 砕石に係わる資源消費

砕石に係わる資源消費としては、採石場で用いられる重機の消費燃料を対象とした。なお、採石場の重機の利用状況は、採石場の規模によってまちまちであるので、今回は採石量が 3500t/日の採石場のデータを使用した。表-9に採石場で用いる重機の条件を、表-10に資源消費量を示す。

表-9 砕石に用いる重機の稼働条件 (3500t/日採石場)

	使用台数	稼働時間(h)	燃料種	燃料使用量 (L/台・h)
クローラードリル	2	1.5	軽油	5.57
ブルドーザ	1	3.0	軽油	54.33
バックホウ	1	2.0	軽油	41.92
50t ダンプ	3	2.0	ガソリン	38.66

表-10 砕石に係わる資源消費量 (砕石 1t 当たり)

燃料種	重機種	砕石 1t 当たりの燃料使用量 (L)	資源消費量 (L/t-砕石)
軽油	クローラードリル	0.0048	0.0753
	ブルドーザ	0.0466	
	バックホウ	0.0240	
ガソリン	50t ダンプ	0.0663	0.0663

(3) トラック輸送に係わる資源消費

トラック輸送は 10t トラックで行うものとした。トラックの燃費は、経済産業省告示第 66 号より、0.0575L/t・km と設定した。

(4) アスファルト混合物の生産に係わる資源消費

アスファルト混合物生産に係わる資源消費量としては、(社)日本アスファルト合材協会が公表している統計値 (H17年度) より全国平均値を算出して原単位として用いた (表-11)。なお、アスファルト混合物の生産効率は、砕石使用の場合とスラグ使用の場合で、違いがないものと仮定して計算することにした。

表-11 アスファルト混合物生産の資源消費量の原単位

	単位	原単位
電気消費量	kWh/t	10.2
	kWh/m ³	25.3
重油消費量	L/t	9.7
	L/m ³	24.1

(5) 舗装工事に係る資源消費

舗装工事に係る資源消費としては、工事現場で用いられる重機の消費燃料を対象として算出した。算出に当たっては、国土交通省「土木工事標準積算基準書」に基づき、舗装工事の施工量および重機の燃料消費量を設定した。設定値の一覧を表-12、13に示す。表-12、13の値を用い、舗装工事に係る資源消費量は以下のように算出した。

【路盤工】

- ・ 1日の燃料使用量=54+30+36=120L/日
- ・ 1000m²当たり施工日数=
1/1.580+1/1.110+1/1.580+1/1.110=3.07日
- ・ 1000m²当たり燃料使用量=120×3.07
=368.4L/1000m²

【舗装工】

- ・ 1日の燃料使用量=65+35+41=141L/日
- ・ 1層 1000m²当たり施工日数=1/2.300=0.43日
- ・ 1層 1000m²当たり燃料使用量=141×0.43
=60.6L/1000m²
- ・ 2層 1000m²当たり燃料使用量=60.6×2
=121.2L/1000m²

表-12 舗装工事の施工量

工事種	施工量 (m ³ /日)
不陸整正	1,580
下層路盤	1,110
上層路盤	1,110
アスファルト舗装工 1.4≤b≤3.0	1,300
アスファルト舗装工 3.0<b	2,300

表-13 舗装工事に用いる重機の燃料消費量

	燃料種	使用量 (L/日)
モータグレーダ 3.1m	軽油	54
ロードローラ マカダム 10~12t (路盤工)	軽油	30
ロードローラ マカダム 10~12t (舗装工)	軽油	35
タイヤクタ 8~20t (路盤工)	軽油	36
タイヤクタ 8~20t (舗装工)	軽油	41
アスファルトフィニッシャー ホル型 1.4~3.0m	軽油	23
アスファルトフィニッシャー ホル型 2.4~6.0m	軽油	65

舗装工事に係る資源消費量は、表-4の年間舗装面積に基づき表-14のようになる。なお、砕石を非鉄金属ス

ラグに置き換えた場合も舗装工事の能率は変わらないと仮定して、資源消費量は変化しないものとした。

表-14 舗装工事に係る資源消費量

	設定値	単位	備考
年間舗装面積	1,767,000	m ² /年	表-4より
軽油消費原単位	489.6	L/1000m ²	設定値 (368.2+121.2)
軽油消費量	865,123	L	施工量×軽油消費原単位

3.1.4 非鉄金属スラグを舗装へ利用した場合の環境負荷

(1) モデルケースの設定

a) 検討ケースの設定

細骨材と路盤材の需要量及び非鉄金属スラグの供給可能量について表-5、6を基に整理し表-15に示す。

非鉄金属スラグの舗装への利用を考えた場合、細骨材、路盤材と置き換えていくことになるが、その置き換え率を変化させて検討ケースを設定した。検討ケースを表-16に示す。なお、表-16の条件は細骨材と路盤材の需要量に対し、スラグの供給可能量は少ないこと、銅スラグには徐冷スラグがなく、路盤材には適用できないことなどを考慮して設定した。

Case0は、スラグを使用しない通常の舗装の場合を比較のために設定した。Case1~5は、アスコン用の細骨材および路盤材の一部を置き換えるような設定とした。

表-15 砕石の需要量とスラグの供給可能量

	需要量	供給可能量
細骨材	64,921m ³ /年	126,557m ³ /年 (Cuスラグ) 313,244m ³ /年
路盤材	530,100m ³ /年	(Fe-Niスラグ)

表-16 検討ケース (舗装資材の置き換え割合)

	置き換え対象	Case 0	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Fe-Niスラグ	細骨材	0%	20%	0%	20%	0%	0%
	路盤材	0%	0%	0%	57%	60%	60%
Cuスラグ	細骨材	0%	0%	20%	0%	20%	100%

b) 最終処分

現在、非鉄金属スラグは何らかの形で全て消費されており、最終処分は行われていないため、最終処分量=0とした。

c) 輸送距離

砕石、フェロニッケルスラグ、銅スラグの輸送距離の設定を表-17に示す。①砕石では採石場が各都道府県に

表-18 検討ケースにおける各種消費量

			単位	Case0	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	
骨材生産	天然砕石	路盤材	t/年	1,431,270	1,431,270	1,431,270	615,446	572,508	572,508	
		細骨材	t/年	175,286	140,229	140,229	140,229	140,229	0	
	Fe-Niスラグ ^{注1)}	路盤材	t/年	0	0	0	906,471	954,180	954,180	
		細骨材	t/年	0	38,953	0	38,953	0	0	
	Cuスラグ ^{注2)}	細骨材	t/年	0	0	45,445	0	45,445	227,223	
天然砕石生産に係わる資源消費 ^{注1)}	軽油消費量	ℓ/年	120,974	118,334	118,334	56,902	53,669	43,110		
	ガソリン消費量	ℓ/年	106,515	104,190	104,190	50,101	47,254	37,957		
アスコン生産	アスコン量 ^{注2)}		m ³ /年	176,700						
	電気使用量		MWh	4,471						
	重油使用量		kℓ	4,258						
舗装工事	舗装工事面積 ^{注3)}		m ² /年	1,767,000						
	軽油消費量		ℓ/年	865,123						
輸送	砕石(距離57.6km)	軽油消費量	ℓ/年	5,320,915	5,204,805	5,204,805	2,502,796	2,360,585	1,896,146	
	Fe-Niスラグ(距離315.2km)	軽油消費量	ℓ/年	0	705,976	0	17,134,856	17,293,558	17,293,558	
	Cuスラグ(距離157.6km)	軽油消費量	ℓ/年	0	0	411,819	0	411,819	2,059,096	
	合計		軽油消費量	ℓ/年	5,320,915	5,910,781	5,616,624	19,637,652	20,065,963	21,248,801

注1)スラグは、金属生産に伴う副産物として、生産に係わる資源消費を計上していない。

注2)アスコン生産は、スラグを使用しても効率は変わらないと仮定している。

注3)舗装工事は、スラグを使用しても効率は変わらないと仮定している。

表-17 輸送距離

	設定値	計算方法
砕石	57.6km	都道府県の疑似半径 $=\sqrt{(10,400\text{km}^2/\pi)}=57.6\text{km}$
Fe-Niスラグ	315.2km	15 都道府県の疑似半径(扁平率0.5の楕円の長辺) $=\sqrt{(10,400\text{km}^2 \times 15/0.5\pi)}$ $=315.2\text{km}$
Cuスラグ	157.6km	Fe-Ni スラグの輸送距離の 1/2

1つあるとして都道府県の疑似半径、②フェロニッケルスラグでは精錬工場が全国3カ所であるので、15 都道府県の疑似半径とするが、日本国土が細長いことを考慮して扁平率0.5の楕円の長辺、③銅スラグでは、精錬工場が全国6カ所のため、フェロニッケルスラグの半分、としてそれぞれ求めた。

(2)資源消費量

検討ケースで設定した条件に基づき各種の資源の消費量を計算した結果を表-18 に示す。スラグは、天然骨材より密度が大きいため、使用率が大きくなるほど、使用材料の重量が増加する。また、スラグは精錬所の数が少ないことから、輸送距離が増大するため、使用率が増加するほど、輸送による燃料消費が増大している。

(3)環境負荷原単位

環境負荷原単位は、表-19 示す値を用いた。なお、環境負荷の算出に当たっては、LCA 算出ソフト JEMAI-LCA Pro ((財)産業環境管理協会) を利用し、基本的にこのソフトにある原単位等を使用した。

また、今回解析対象から除外した非鉄金属精錬に係わる環境負荷原単位、および今回の計算に含まれてない最終

表-19 燃料消費および電力消費の環境負荷原単位

	エネルギー量(MJ)	排出量(kg)				
		CO ₂	Sox	NOx	SPM	
燃料	ガソリン(L)	35.1	2.47E+0	7.57E-5	7.61E-4	8.62E-5
	軽油(L)	38.2	2.69E+0	8.24E-5	8.29E-4	9.39E-5
	A重油(L)	39.1	2.77E+0	1.30E-3	8.07E-4	9.50E-5
電力(kWh)	9.1	3.99E+1	5.15E-5	1.62E-4	1.72E-6	

表-20 金属精錬および最終処分環境負荷原単位

	エネルギー量(MJ)	排出量(kg)				
		CO ₂	SOx	NOx	SPM	
金属精錬	Fe-Ni(t)	22.2	2.36E+0	1.26E-3	9.98E-4	2.49E-4
	Cu(t)	29.1	1.66E+0	8.21E-4	8.02E-4	1.41E-4
最終処分(m ³)	346.34	37.17	59.62	92.13	-	

処分に係わる環境負荷原単位を算出した結果を表-20 に示す。なお、最終処分に係わる環境負荷原単位の算出は、「広域最終処分場計画調査 廃棄物海面埋立環境保全調査報告書(土木学会)」¹⁾を参考にした。

(4)環境負荷の試算結果

環境負荷の試算結果を表-21 に示す。スラグ使用率が骨材全体の60%程度以上になるよう設定したCase3~5は、全般的に環境負荷量が大きくなっていることがわかる。ただし、SOxについては、アスファルト混合物生産段階で重油を使用していることから、重油使用による排出量が多いため、Case1~5まで大きな差がなかった。

表-21 環境負荷量

	エネルギー量 (MJ)	排出量 (kg)			
		CO ₂	SO _x	NO _x	SPM
Case0 (比較)	451,975	30,798	6.30	9.47	1,014
Case1	474,335	32,369	6.34	9.96	1,069
Case2	463,093	31,579	6.32	9.72	1,041
Case3	994,666	68,931	7.47	21.25	2,347
Case4	1,010,881	70,066	7.50	21.60	2,387
Case5	1,055,284	73,190	7.60	22.57	2,496

3.1.5 統合化評価

(1) 統合化係数

各環境負荷を総合評価するためには、同一の単位にして加算することが必要である。今回は、現在のところ日本の現状に最も適合しているものとして LIME 係数を用いることにした。LIME 係数は経済産業省 LCA プロジェクトにより開発されたもので、被害算定型影響評価手法をとっている。温暖化、オゾン層破壊、健康被害、生態系へ影響などを考慮して、被害コストを円で算出できるのが特徴である。LIME 係数を表-22 に示す。

表-22 LIME 係数

	エネルギー量 (MJ)	円/kg			
		CO ₂	SO _x	NO _x	SPM
LIME 係数	66.6	2180	1077.3	189.1	2.45

(2) 統合評価

表-21 と表-22 から、統合化評価を行った。結果を図-6 および 7 に示す。

図-6 は環境負荷量別に示したものであるが、CO₂ 排出、エネルギー消費に係わるものが全体のほとんどを占め、骨材使用率が骨材全体の 60% 程度以上になるよう設定した Case3~5 では、非常に負荷が大きくなる計算になり、通常 (Case0) の 2 倍以上と算出された。

また、これを碎石生産、アスコン生産、舗装工事、輸送に分けて示すと、図-7 のようになった。アスコン生産、舗装工事は、スラグを使用しても効率が変わらないと仮定していることから、どのケースでも同じであるが、碎石生産による負荷はスラグ使用率が増えるに従って減少している。しかし、スラグを使用すると、輸送による環境負荷が増大するため、全体では非常に増大しているのが分かる。

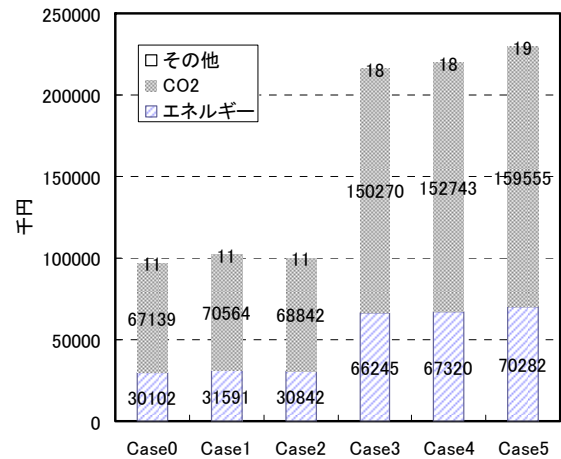


図-6 統合化評価 (環境負荷別)

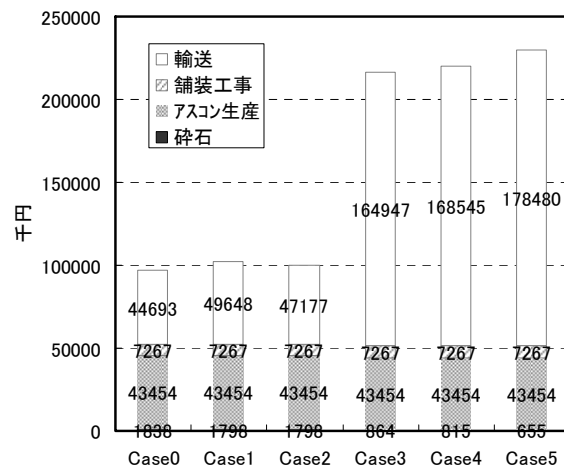


図-7 統合化評価 (段階別)

(3) 輸送距離の影響

(2) の検討で、輸送による環境負荷が大きな割合を占めることが分かった。また、今回の条件設定では、輸送距離をフェロニッケルスラグで 315.2km、銅スラグで 157.6km としたが、ヒアリングによると実際の出荷は生産工場から 100km 圏内ということだったので、輸送距離の影響について検討した。

輸送距離としては、フェロニッケルスラグ、銅スラグともに輸送距離を 50,60,70km とし、計算を行った。結果を図-8 に示す。

スラグ使用率が骨材全体の 8% 程度に設定した Case1,2 は、輸送距離が増す毎に環境負荷が増大しているが、使用しない場合と比べて大きな差は見られない。しかし、スラグ使用率が骨材全体の 60% を超える Case3~5 は輸送距離が増すと、環境負荷が著しく増大している。しかし、輸送距離が 50km のときは、天然碎石を使

用するよりも環境負荷が小さく計算され、輸送距離が短ければ環境負荷を低減させることができる可能性があることが示された。

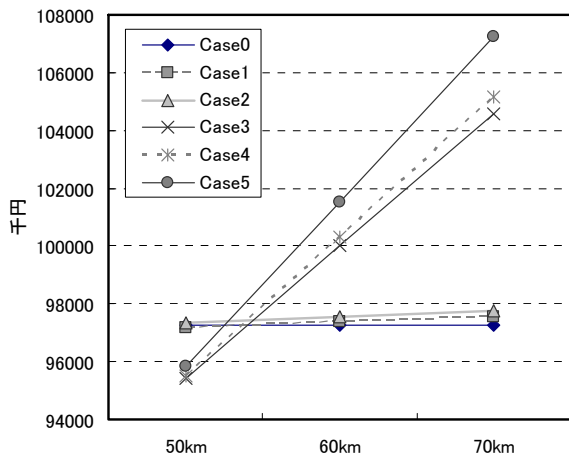


図-8 スラグの輸送距離による環境負荷の比較

3.1.7 非鉄金属スラグ利用舗装のまとめ

フェロニッケルスラグと銅スラグを舗装へ利用した場合の環境負荷について、LCA手法を用いて評価した。その結果、以下のように考えられた。

- (1) 細骨材の一部をスラグで代替する場合は、細骨材はアスファルト混合物の全体の40%であるため、スラグへの置換え率があまり大きくなり、通常の骨材と比べて、環境負荷はあまり変わらないものと考えられた。
- (2) 路盤材としてスラグを利用する場合、スラグへの置換え率が大きくなりやすく、環境負荷が増大する傾向が見られた。
- (3) 環境負荷増大の原因は、輸送距離が長いことが挙げられ、これを小さくすれば、通常よりも環境負荷を低減させられる可能性もあると考えられた。

ただし、今回の検討では、いくつかの課題があり、今後これらの解決が必要である。課題は、以下のものが考えられた。

- (1) 天然骨材の生産については、ダイナマイトの使用による負荷や、土地利用改変による環境影響など、評価が出来ていないものがある。
- (2) アスファルト混合物生産については、プラント内での重機の使用実態がつかめず、計算に含めることが出来ていない。
- (3) スラグについては、スラグ自体が安全なものを前提としているが、安全性の確保のための方策が別途必要である。

- (4) スラグ利用の場合も、生産効率が変わらないと仮定しているが、詳細の確認が必要。
- (5) スラグ利用の場合も、舗装の性能は同じと仮定しているが、確認が必要である。
- (6) ライフサイクルコストも考慮した解析が必要。
- (7) 舗装発生材は、99%再利用されているが、スラグ利用の場合、2回目以降の再利用の際に障害がでないか、確認が必要である。

3.2 ゴミ溶融スラグ利用舗装のライフサイクル評価

3.2.1 概要

最終処分場の逼迫を背景として、都市ゴミ焼却灰よりも一層の減容化を目的として、全国で溶融処理が行われるようになってきている。この溶融処理によりゴミ溶融スラグが発生し、このスラグを舗装用の骨材として利用が期待されている。しかし、溶融処理には膨大なエネルギーを必要としているため、再資源化を主目的として溶融処理を行った場合、環境負荷を増大させている可能性がある。

そこで、ゴミ溶融スラグを利用した舗装のライフサイクル評価を行うこととした。ゴミの溶融処理には、ゴミ焼却灰を溶融する灰溶融とゴミを直接溶融する直接溶融がある。最近では直接溶融する施設が増加してきているが、2005年の時点で、灰溶融施設が約6割を占めている²⁾。このため、本解析では灰溶融によるゴミ溶融スラグを対象とし、焼却灰を利用せず最終処分する場合と、焼却灰を灰溶融し、舗装に利用する場合に分けて検討を行った。

評価は、2.3.1にしたがって行った。

3.2.2 評価モデルの設定

(1) 評価モデル

モデル都市空間の条件は、表-3に示すように設定した。

評価対象範囲は図-9に示すとおり、都市ゴミの焼却処理までは舗装利用の有無に関係なく行われるものとし、評価対象外とした。なお、耐用期間を超えた舗装材は、ほぼ100%再利用されており、ゴミ溶融スラグ利用舗装も同様であると仮定して最終処分場への廃棄については評価対象としなかった。

資材の平均的な輸送距離を設定するために、各資材の生産拠点の配置を図-10のように設定した。この結果、各材料の輸送距離は、表-23に示すとおりとなった。

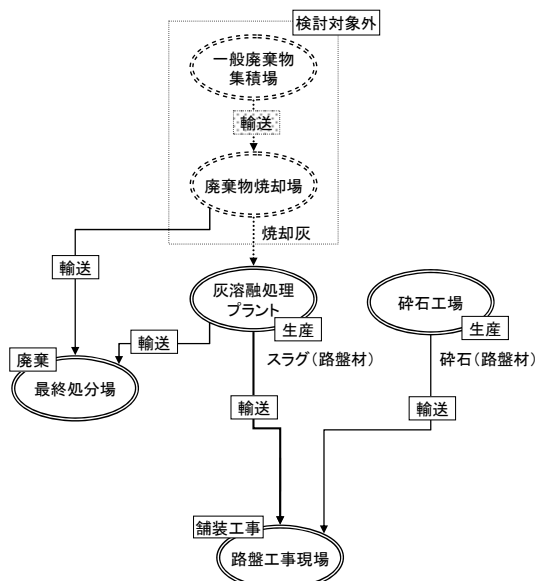


図-9 評価対象範囲

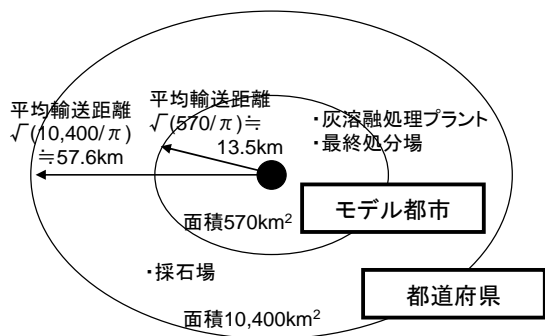


図-10 各種資材の生産地の配置と輸送距離の設定

表-23 材料輸送距離の設定値

経路	輸送距離
砕石(路盤材) → モデル都市	57.6km
ゴミ溶融スラグ → モデル都市	13.5km
焼却灰 → 最終処分場(モデル都市)	13.5km
溶融飛灰 → 最終処分場(モデル都市)	13.5km

(2)検討ケースの設定

検討ケースは表-24 のように設定した。検討ケースとしては、生産されたゴミ溶融スラグは全て路盤材として利用するものとして、不足する分に砕石を利用するように設定した。灰溶融処理に関しては、大きく分けて電気式と燃料式の二つがあり、その中でも電気式(プラズマ式)、燃料式(表面溶融式)が特に多い²⁾ため、この二つのタイプの溶融処理について試算した。

表-24 検討ケース

	ケース1 (比較用)	ケース2	ケース3
溶融処理	溶融処理なし 焼却灰は全て最終処分	溶融処理(電気式) 溶融飛灰は最終処分	溶融処理(燃料式) 溶融飛灰を最終処分
路盤	全て砕石	ゴミ溶融スラグの生産分を全て路盤材 残りを砕石	ゴミ溶融スラグの生産分を全て路盤材 残りを砕石

3.2.3 資源の需要量・スラグの生産量等の算定

(1) 舗装資材の需要量

再生資材の利用は路盤材への利用に絞った。路盤の厚さは下層路盤15cm、上層路盤15cmとした。舗装の耐用年数は10年とし、10年に一度路盤の打換えを行うものとした。この条件とモデル空間都市の条件(表-3)から舗装資材の需要量を算出すると、表-25 のようになった。

表-25 舗装資材の需要量

項目	設定値	単位	備考
年間舗装面積	1,767,000	m ² /年	道路面積 ÷耐用年数
路盤材需要量	530,100	m ³ /年	年間舗装面積 ×路盤厚

(2)ゴミ溶融スラグの生産量

ゴミ溶融スラグの生産量は、一般廃棄物の排出量などに関係することから統計値などを用いて表-26 のように設定した。

表-26 ゴミ溶融スラグの生産量

廃棄物の排出量	5,161 万トン	循環型社会白書(平成17年度版) ³⁾ より
廃棄物の排出原単位	1,107 g/人・日	人口1億2776万人(平成17年1月1日)より
焼却処分量	4,202 万トン	循環型社会白書(平成17年度版) ³⁾ より
廃棄物の焼却処分原単位	901 g/人・日	人口1億2776万人(平成17年1月1日)より
その他の中間処理量	658 万トン	循環型社会白書(平成17年度版) ³⁾ より
中間処理後資源化量	350 万トン	循環型社会白書(平成17年度版) ³⁾ より
溶融スラグ密度	2.7 t/m ³	「スラグの有効利用マニュアル」 ⁴⁾ より

(3)灰溶融炉の用役等原単位

灰溶融炉では灰を投入して、用水や薬剤として、消石灰、アンモニア水、キレート剤、セメントなどを用いたスラグを製造している。溶融処理の用役等の原単位をメーカーヒアリングから表-27、28 に示す値とした。

(4)フロー

設定により、焼却灰、ゴミ溶融スラグ、砕石などの量を求め、フローにしたものを図-11、12、13 に示す。図-11 は焼却灰を全て最終処分し、路盤材は全て砕石とした場合で、図-12、13 はゴミ焼却灰を全て溶融処理し、ゴミ溶融スラグは全て路盤材に利用する場合である。

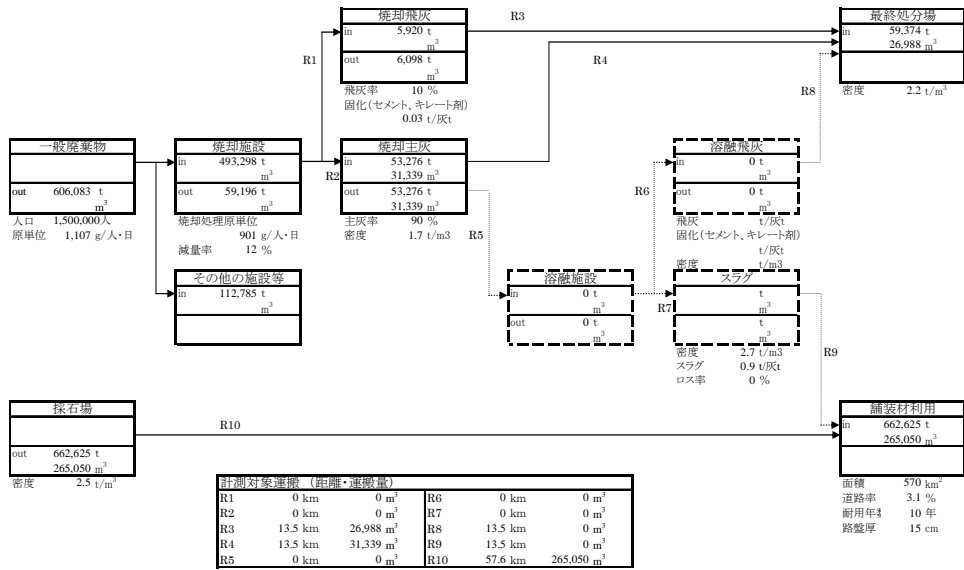


図-11 ケース1におけるフロー

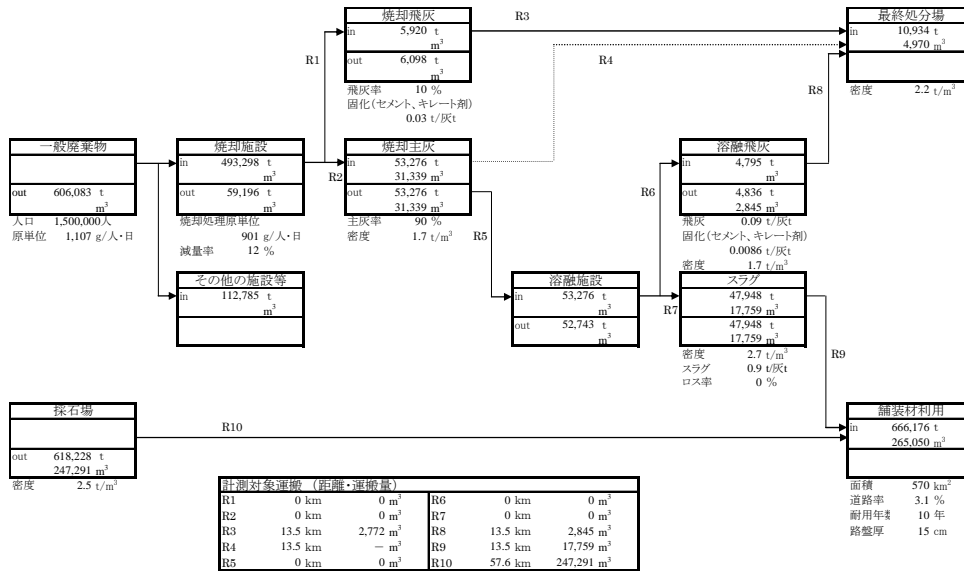


図-12 ケース2におけるフロー

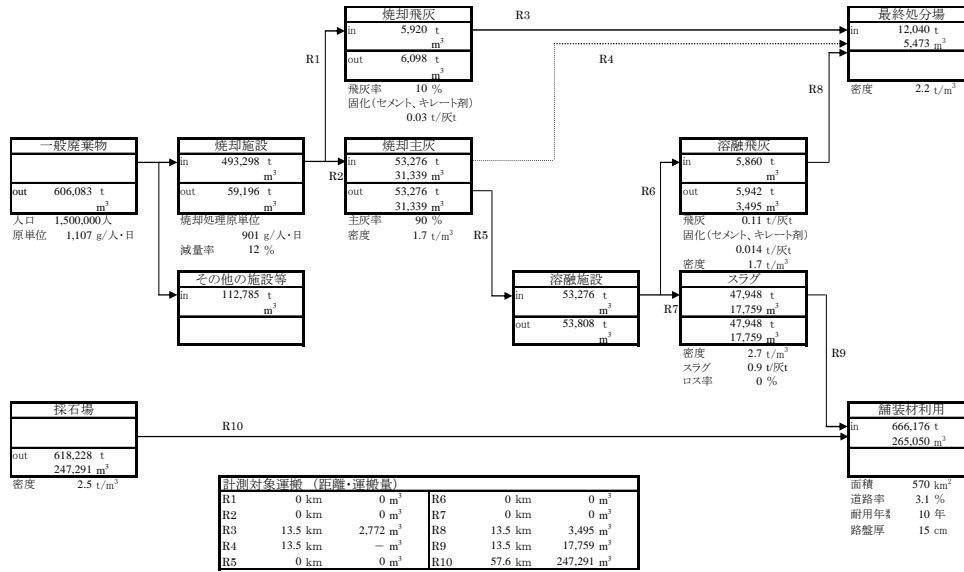


図-13 ケース3におけるフロー

表-27 電気式（プラズマ）溶融炉の用役等原単位

電力	契約電力	3,500 kWh
	電力量	800 kWh/灰t
灯油		20 L/灰t
薬剤	消石灰	12 kg/灰t
	アンモニア水	1.7 kg/灰t
	キレート剤	1.3 kg/灰t
	セメント	7.3 kg/灰t
用水		2.5 m ³ /灰t
排ガス量		5,000 Nm ³ /灰t
排水		1.0 m ³ /灰t
飛灰		90 kg/灰t
スラグ		0.9 t/灰t

メーカーヒアリング値

表-28 燃料式（表面溶融）溶融炉の用役等原単位

灯油		250 L/灰t
電力	契約電力	1,100 kWh
	電力量	250 kWh/灰t
薬剤	消石灰	5 kg/灰t
	キレート剤	1 kg/灰t
	セメント	13 kg/灰t
用水		2.5 m ³ /灰t
排ガス量		8,000 Nm ³ /灰t
排水		1.0 m ³ /灰t
飛灰		110 kg/灰t
スラグ		0.9 t/灰t

メーカーヒアリング値

(5)資材の需要量

前項のフローに示した各資材の量を整理して表-29 に示す。

表-29 各種基本資材のモデル都市内での需要量

	単位	ケース1	ケース2	ケース3
		通常材路盤	スラグ(電気溶融)+通常材	スラグ(燃料式)+通常材
需要量(容積)	m ³ /yr	530,100	530,100	530,100
通常材(碎石)	m ³ /yr	530,100	512,341	512,341
スラグ	m ³ /yr	0	17,759	17,759
碎石密度	t/m ³	2.5	2.5	2.5
スラグ密度	t/m ³	2.7	2.7	2.7
碎石需要量(質量)	t/yr	1,325,250	1,280,853	1,280,853
スラグ需要量(質量)	t/yr	0	47,949	47,949

(6)トラック輸送量と燃料消費量

トラックの燃費については経済産業省告示第66号「貨物輸送事業者に行わせる貨物の輸送に係わるエネルギー消費量の算定方法」より0.0575L/t・kmとした。算出結果を表-30に示す。

表-30 トラック輸送量と燃料消費量

輸送量(行き先)	単位	ケース1	ケース2	ケース3	輸送距離(設定値)
		通常材路盤	スラグ(電気溶融)+通常材	スラグ(燃料式)+通常材	
碎石(現場)	t	1,325,250	1,280,853	1,280,853	57.6 km
スラグ(現場)	t	0	47,949	47,949	13.5 km
灰(最終処分場)	t	59,374	10,934	12,040	13.5 km
軽油消費量					
碎石(現場)	L	4,389,228	4,242,183	4,242,183	
スラグ(現場)	L	0	37,221	37,221	
灰(最終処分場)	L	46,089	8,488	9,346	
合計	L	4,435,317	4,287,892	4,288,750	

(7)溶融処理における資源消費量

溶融処理における資源消費量については、処理灰量と用役等の原単位から求めた。なお、環境負荷原単位に産業連関表から求めた原単位を用いた項目があるため、消費量を円で表している項目もある。

表-31 溶融処理における資源消費量

	単位	ケース1	ケース2	ケース3	備考
		通常材路盤	スラグ(電気溶融)+通常材	スラグ(燃料式)+通常材	
電力量	kWh	—	42,620,904	58,603,600	
灯油	L	—	1,065,523	13,319,033	
消石灰	kg	—	639,314	266,381	
アンモニア水	千円	—	4,076	0	単価45円/kgで計算
キレート剤	kg	—	69,259	53,276	
セメント	千円	—	3,345	5,956	単価8.6円/kgで計算
用水	千円	—	42,088	42,088	単価316円/m ³ で計算
排水	千円	—	9,057	9,057	単価170円/m ³ で計算
電力量(冷却設備)	kWh	—	47,949	47,949	

(8)舗装工事に係わる燃料消費量

路盤工（不陸整正、下層路盤施工、上層路盤施工）で使用する重機は、国土交通省「土木工事標準積算基準書」を基に、モータグレーダ、ロードローラ、タイヤローラを各1台とし、これらの施工量も基準書を基に表-32のとおり設定した。さらに、各機材の規格と燃料消費量についても、基準書を基に表-33のとおり設定した。

表-32 日施工量

	単位	数量
不陸整正	m ²	1,580
路盤工	m ²	1,110

表-33 各機材と燃料消費量

	規格	燃料消費量
モータグレーダ運転	3.1m	54 L/運転1日
ロードローラ運転	排ガス対策型・マカダム 両輪駆動 10~12t	30 L/運転1日
タイヤローラ運転	排ガス対策型 8~20t	36 L/運転1日

これらの設定に基づき、1台当たりの必要日数を算出すると、下記のようになり、この日数から燃料消費量は表-34のとおりとなった。

- 路盤工（不陸整正）

$$1 \text{ 台当たりの必要日数} = 1,800,000\text{m}^2 \div 1,580\text{m}^2/\text{日} = 1,140 \text{ 日}$$

- 路盤工（下層路盤、上層路盤工）

$$1 \text{ 台当たりの必要日数} = 1,800,000\text{m}^2 \div 1,110\text{m}^2/\text{日} = 1,622 \text{ 日}$$

表-34 路盤工における燃料消費量 (軽油)

軽油消費量	単位	ケース1	ケース2	ケース3	備考
		通常材路盤	スラグ(電気溶解)+通常材	スラグ(燃料式)+通常材	
モータグレーダ	L	236,736	236,736	236,736	
ロードローラ	L	131,520	131,520	131,520	
タイヤローラ	L	157,824	157,824	157,824	
合計	L	526,080	526,080	526,080	

(9)最終処分に伴う燃料消費

最終処分では、最終処分場で使用する重機の燃料消費量を文献⁵⁾等から表-35、36のように設定した。

表-35 最終処分場での重機原単位

重機	台数	稼働時間
ブルドーザ	36 台/灰千t	8 時間

「廃棄物物理立処分場の建設と管理」(田中信壽著)

表-36 ブルドーザの消費燃料

重機	燃料	燃料消費率(L/kWh)	機関出力(kW)	燃料消費(L/h)
ブルドーザ(15t)	軽油	0.188	100	18.8

これら数値から灰 t 当たりの燃料消費量を求めると以下のようになった。

$$\begin{aligned} & \text{灰 t 当たりの燃料消費量} \\ & = 36 \text{ 台/灰千 t} \times 1000 \times 8 \text{ h} \times 18.8 \text{ L/h} \cdot \text{台} \\ & = 5.4144 \text{ L/灰 t} \end{aligned}$$

3.2.3 環境負荷原単位の作成

(1) 溶解処理用役等の原単位

溶解処理の用役等の環境負荷原単位は、JEMA-LCA Pro⁷⁾の値を用いたが、これにないものは、国立環境研究所から公表されている産業連関表による環境負荷原単位データブック (3EID)⁸⁾より求めた数値を用いた。表-37に値を示す。

表-37 溶解処理に用いる資材の環境負荷原単位

	エネルギー量 (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)	SO _x 排出量 (kg-SO _x)	NO _x 排出量 (kg-NO _x)	SPM排出量 (kg-SPM)	出典
消石灰 kg	3.89E+00	8.59E-01	1.55E-04	2.72E-04	5.00E-06	文献7)
アンモニア水 千円	6.34E+02	3.77E+01	9.60E-03	4.51E-02	3.50E-03	文献6)
キレート剤 kg	0.00E+00	3.44E+00	3.34E-03	4.67E-03	5.05E-04	文献6)
セメント 千円	5.51E+02	1.11E+02	1.88E-02	1.85E-01	7.00E-03	文献6)
用水 千円	3.77E+01	2.22E+00	1.63E-03	2.46E-03	2.70E-04	文献6)
排水 千円	9.09E+01	5.99E+00	1.43E-02	6.22E-03	1.27E-03	文献6)

(2) 最終処分の原単位

最終処分場の原単位は、文献⁹⁾を参考に設定した。表-38に値を示す。なお、文献では海面処分場と内陸処分場それぞれについて原単位が報告されているが、国内における最終処分場は、山間および平地に設置されているものが98%程度であったため、内陸処分場の数値を用いた。

表-38 最終処分における環境負荷原単位

	エネルギー量 (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)	SO _x 排出量 (kg-SO _x)	NO _x 排出量 (kg-NO _x)	SPM排出量 (kg-SPM)	出典
建設時 m ³	2.49E+02	2.55E+01	4.80E-02	5.48E-02	—	文献1)
運用時 m ³	1.15E+02	1.17E+01	1.16E-02	3.74E-02	—	

3.2.4 ゴミ溶解スラグ利用舗装の環境負荷量の算定

上記までの調査を基に、ゴミ溶解スラグを舗装に使用した場合の環境負荷量を算定した。結果を表-39に示す。この表を基にエネルギー消費量およびCO₂排出量について図示すると図-14、15のようになった。

ケース1とケース2、3を比較すると、エネルギー量、CO₂排出量ともにスラグ製造にかかる部分が極めて大きく、最終処分量が減ることによる減少量よりはるかに大きいために、全体の環境負荷量が大きくなった。特にケース3では、スラグ製造によるエネルギー量、CO₂排出量がケース2と比べて2倍以上あり、燃料式によるスラグ製造の環境負荷の高さが示された。

ただし、最終処分場の評価に当たっては、文献を参考に算出しているが、土地の改変による影響や、景観への影響、さらには新規建設の難しさなどが評価されていないので、これらの評価が行えるようになれば、また違う評価になる可能性もある。

表-39 算出結果

		エネルギー量 (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)	SO _x 排出量 (kg-SO _x)	NO _x 排出量 (kg-NO _x)	SPM排出量 (kg-SPM)
ケース1	砕石	2.36E+07	1.20E+06	1.09E+02	4.41E+02	1.93E+01
	スラグ	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	路盤工	2.01E+07	1.42E+06	4.33E+01	4.36E+02	4.94E+01
	最終処分	2.21E+07	1.87E+06	1.64E+03	2.75E+03	3.02E+01
	輸送(軽油)	1.70E+08	1.19E+07	3.65E+02	3.68E+03	4.16E+02
ケース2	砕石	2.28E+07	1.16E+06	1.06E+02	4.26E+02	1.87E+01
	スラグ	4.36E+08	2.13E+07	2.90E+03	9.12E+03	2.75E+02
	路盤工	2.01E+07	1.42E+06	4.33E+01	4.36E+02	4.94E+01
	最終処分	4.07E+06	3.44E+05	3.01E+02	5.07E+02	5.56E+00
	輸送(軽油)	1.64E+08	1.15E+07	3.53E+02	3.55E+03	4.03E+02
ケース3	砕石	2.28E+07	1.16E+06	1.06E+02	4.26E+02	1.87E+01
	スラグ	1.03E+09	5.93E+07	4.36E+03	2.04E+04	1.48E+03
	路盤工	2.01E+07	1.42E+06	4.33E+01	4.36E+02	4.94E+01
	最終処分	3.13E+06	2.83E+05	3.29E+02	5.29E+02	2.78E+00
	輸送(軽油)	1.64E+08	1.15E+07	3.53E+02	3.56E+03	4.03E+02

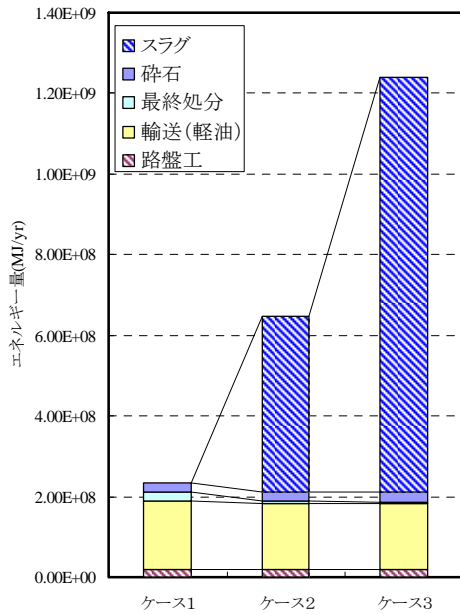


図-14 エネルギー量の算出結果

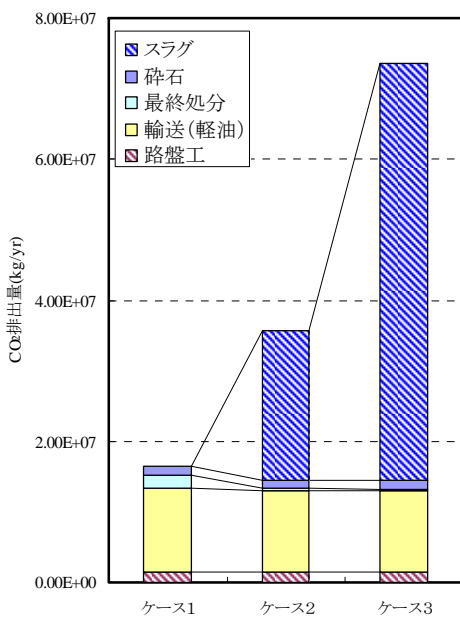


図-15 CO₂排出量算出結果

3.2.5 ゴミ溶融スラグ利用舗装のまとめ

本研究では、処理施設の多い灰溶融炉について検討を行い、灰をそのまま最終処分する場合と、灰溶融を行って舗装に利用する場合について解析した。ここで得られた主な知見をまとめると次のとおりである。

- (1) ゴミ溶融処理に関する原単位はほとんど整備されていない。本研究では、生産方法の聞き取り調査などから原単位を作成した。
- (2) ゴミ溶融スラグを路盤材へ利用する場合、スラグ製

造の環境負荷が大きく、最終処分量の減少分を見込んでも通常材の2倍以上となった。

- (3) 溶融方式は、電気式（プラズマ）の方が燃料式（表面溶融）よりも環境負荷が小さいことがわかった。

今後の課題としては以下のことが考えられる。

- (1) 使用する機械やプラントの製造に関する環境負荷量については、考慮していないことから、今後はこれを試算する必要がある。
- (2) 環境負荷原単位が不明なものは、ヒアリングなどで補充して作成したが、できるだけ平均的な値が得られるように、統計値の充実が必要である。
- (3) ライフサイクル評価は、耐久性の設定で評価が変わるが、廃棄物再生資材では長期供用の実データがなく、不明な点が多い。従って、各種の長期供用データも必要である。
- (4) 廃プラ、廃ゴムを利用した舗装がリサイクル不可能な場合は、環境負荷が増大するため、舗装としてのリサイクルの可否の確認が必要である。
- (5) 今回、ゴミ溶融スラグについては灰溶融炉について解析を行ったが、近年ガス化溶融炉の施設数も増加傾向にあり、ガス化溶融炉も含めた評価が今後は必要である。
- (6) 今回、できるだけ最終処分場の環境負荷を考慮するようにしたが、土地改変、景観、新設の難しさなどは、配慮されておらず、今後、これらの観点からの評価も必要である。

3.3 廃タイヤ・廃プラスチック利用舗装のライフサイクル評価

3.3.1 概要

廃タイヤ・廃プラスチックを舗装に利用した場合についてライフサイクル評価を行った。いずれもこれまでの技術開発の状況を考慮して、利用方法を決めた。廃タイヤでは、アスファルトに15%添加して廃タイヤ入りのアスファルトを製造してから使用する方法とした。廃プラスチックでは、粗骨材の代替品として使用する方法とした。

評価方法は、2.1.3 にしたがって行った。

3.3.2 評価モデルの設定

(1) 評価モデル

評価モデルは、廃タイヤ、廃プラスチックともに、舗装に利用しない場合は、電力としてエネルギーを回収するサーマルリカバリーが行われるものとし、これと廃タ

イヤ、廃プラスチック利用舗装を比較することとした。

モデル都市空間の条件は、表-3のとおりとした。

評価対象範囲は図-16 に示すとおり、道路舗装事業に関連する原材料生産、資材製造、資材輸送、舗装工事と、これに加えて廃タイヤ、廃プラスチックがサーマルリカバリーされた場合の発電に関するものとした。ただし、廃タイヤ・廃プラスチックは、再生利用の有無に関わらず、集積場に集められるものとし、その一次加工及び輸送は評価対象範囲外とした。なお、耐用期間を超えた舗装材は、ほぼ 100%再利用されることから最終処分場への廃棄については評価対象としなかった。

舗装に用いられる材料の平均的な輸送距離を設定するために、各資材の生産拠点の配置、分散状態を調査し、それらの配置を図-17 のように設定した。この結果、各材料の輸送距離は、表-40 に示すとおりとなった。

(2) 検討ケースの設定

検討ケースとしては、文献調査の結果、廃タイヤも廃プラスチックもアスファルト混合物への利用の可能性が高く、特に廃タイヤはアスファルトの添加剤としての利用、廃プラスチックは混合物の代替利用の可能性が高いものと考えられた。そこで、検討ケースは表-41 のように設定した。

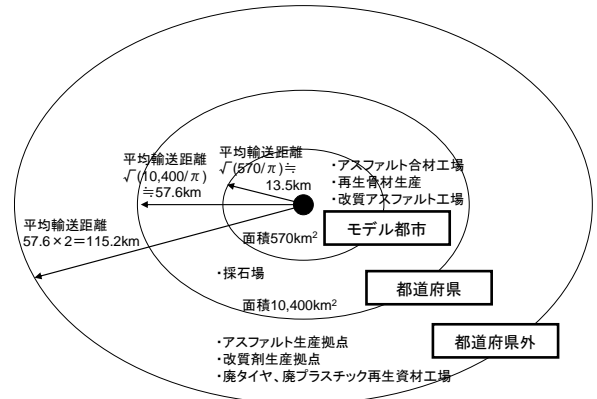


図-17 各種資材の生産地の配置と輸送距離の設定

また、廃タイヤ、廃プラスチックは、現在のリサイクル状況では、エネルギーを回収するサーマルリカバリーが多いため⁸⁹⁾、舗装に利用しない場合は、全てサーマルリカバリーにより発電に利用され、都市内に供給されるものとした。また、舗装に使用する場合は、都市内全体で見れば、廃タイヤ、廃プラスチック発電で発電される電力量と同じ量の公共電力が必要になるため、これも設定した。

(3) 基本資材の需要量の設定

a) 舗装資材の需要量

再生資材の利用は混合物への利用に絞った。ストレートアスファルト使用の混合物の耐用年数は5年、改質アスファルト使用の混合物の耐用年数はこの6倍とした。アスファルト混合物層の厚さは10cmとした。この条件とモデル空間都市の条件(表-3)から舗装資材の需要量を算出すると、表-42 のようになった。なお、耐用年数6倍の設定は、ストレートアスファルトと改質アスファルトは同じ交通条件下では使用しないことから、単純に耐用年数を割り出すことができないものの、比較検討の

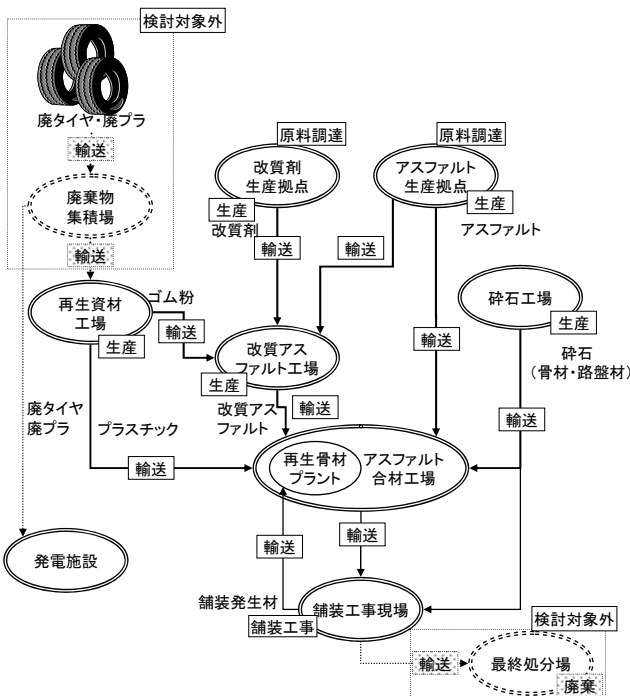


図-16 評価対象範囲

表-40 材料輸送距離の設定値

経路	輸送距離
アスファルト合材工場 → モデル都市	13.5km
再生骨材(モデル都市内生産)	13.5km
改質アスファルト工場 → アスファルト合材工場(モデル都市)	13.5km
探石場 → アスファルト合材工場(モデル都市)	57.6km
アスファルト生産拠点(製油所) → アスファルト合材工場(モデル都市)	115.2km
アスファルト生産拠点(製油所) → 改質アスファルト工場	115.2km
改質材工場 → 改質アスファルト工場	115.2km
廃タイヤ再生資材(ゴム粉)工場 → 改質アスファルト工場	115.2km
廃プラスチック再生資材(骨材)工場 → アスファルト合材工場(モデル都市)	115.2km

表-41 検討ケース

		ケース1 (比較用)	ケース2 (比較用)	ケース3	ケース4	ケース5
舗装部分	表層	密粒度アスファルト混合物 13 (ストレートアスファルト)	密粒度アスファルト混合物 13(改質アスファルト II 型)	密粒度アスファルト混合物 13(ゴム粉 15%アスファルト)	密粒度アスファルト混合物 13(プラ骨材 5%)	密粒度アスファルト混合物 13(プラ骨材 10%)
	基層	粗粒度アスファルト混合物 20 (ストレートアスファルト)	粗粒度アスファルト混合物 20(改質アスファルト II 型)	粗粒度アスファルト混合物 20(ゴム粉 15%アスファルト)	粗粒度アスファルト混合物 20(プラ骨材 5%)	粗粒度アスファルト混合物 20(プラ骨材 10%)
電力		廃プラスチック発電	廃タイヤ発電	公共電力	公共発電 + 廃プラスチック発電	公共電力

表-42 舗装資材の需要量

混合物種	項目	設定値	単位	備考
ストレートアスファルト混合物	年間舗装面積	3,534,000	m ² /年	道路面積 ÷ 耐用年数
	アスコン需要量	353,400	m ³ /年	年間舗装面積 × アスコン層厚
改質アスファルト混合物	年間舗装面積	589,000	m ² /年	道路面積 ÷ 耐用年数
	アスコン需要量	58,900	m ³ /年	年間舗装面積 × アスコン層厚

表-43 各種基本資材のモデル都市内での需要量 (表層)

	単位	ケース1	ケース2
		ストレートアスファルト混合物	改質アスファルト混合物
需要量(容積)	m ³ /yr	176,700	29,450
表層材密度	t/m ³	2.37	2.37
需要量(質量)	t/yr	418,779	69,797
アスファルト	t/yr	21,832	3,457
改質剤	t/yr	0	182
粗骨材	t/yr	226,260	37,710
細骨材・石粉	t/yr	170,687	28,448
備考 (配合) (ストアス混合物) (改質混合物)			
バインダー配合率(対骨材)	質量%	5.5	5.5
改質剤配合率(対アスファルト)	質量%	0.0	5.0
空隙率	容積%	4.0	4.0
粗骨材	質量%	57.0	57.0
細骨材・石粉	質量%	43.0	43.0

表-44 各種基本資材のモデル都市内での需要量 (基層)

	単位	ケース1	ケース2
		ストレートアスファルト混合物	改質アスファルト混合物
需要量(容積)	m ³ /yr	176,700	29,450
表層材密度	t/m ³	2.36	2.36
需要量(質量)	t/yr	417,012	69,502
アスファルト	t/yr	19,858	3,144
改質剤	t/yr	0	165
粗骨材	t/yr	285,951	47,659
細骨材・石粉	t/yr	111,203	18,534
備考 (配合) (ストアス混合物) (改質混合物)			
バインダー配合率(対骨材)	質量%	5.0	5.0
改質剤配合率(対アスファルト)	質量%	0.0	5.0
空隙率	容積%	5.0	5.0
粗骨材	質量%	72.0	72.0
細骨材・石粉	質量%	28.0	28.0

ため同じ交通条件で使用したと仮定して計算することにした。「舗装の構造に関する技術基準・同解説」¹⁰⁾を参考に、改質アスファルト混合物(改質アスファルト II 型)の動的安定度がストレートアスファルトのそれと比べて6倍程度以上が見込めることからそのように設定した。

b) 基本資材の需要量

前項で得られた舗装資材の需要量(表-42)をもとに、必要な基本資材量を算出した。表層、基層はそれぞれ5cmとした。算出結果を表-43、44に示す。

c) トラック輸送量と燃料消費量

トラックの燃費については経済産業省告示第66号「貨物輸送事業者に行わせる貨物の輸送に係わるエネルギー消費量の算定方法」より0.0575Lt・kmとした。算出結果を表-45に示す。

表-45 トラック輸送量と燃料消費量 (基本資材)

輸送量(行き先)	単位	ケース1	ケース2	輸送距離(設定値)
		ストレートアスファルト混合物	改質アスファルト混合物	
アスファルト(プラント)	t	41,690	0	115 km
アスファルト(改質アス工場)	t	0	6,601	115 km
改質剤(改質アス工場)	t	0	347	115 km
改質アス(プラント)	t	0	6,948	13.5 km
砕石(プラント)	t	794,101	132,350	57.6 km
アスファルト合材(現場)	t	835,791	139,299	13.5 km
軽油消費量				
アスファルト(プラント)	L	276,153	0	
アスファルト(改質アス工場)	L	0	43,724	
改質剤(改質アス工場)	L	0	2,301	
改質アス(プラント)	L	0	5,394	
砕石(プラント)	L	2,630,063	438,344	
アスファルト合材(現場)	L	648,783	108,130	
合計	L	3,554,999	597,893	

(4) 廃タイヤ、廃プラスチックの需要量の設定

a) 廃タイヤ、廃プラスチック舗装の需要量

廃タイヤ、廃プラスチックの再生資材を使用した舗装をモデル都市内で利用したときの各資材の需要量を算出した結果を表-46、47に示す。なお、廃タイヤ利用混合物は、改質アスファルト II 型相当の性状が見込める¹¹⁾¹²⁾として改質アスファルト II 型と同じ耐用年数に、廃プラスチック利用混合物は、通常ストレートアスファルト利用の舗装と同じ程度の耐久性であると仮定して耐用年数も同じに設定した。

b) トラック輸送量と燃料消費量

(3)c)と同様に各ケースの燃料消費量を算出した。結果を表-48に示す。

(5) 検討ケースにおける発電量の設定

本検討では、廃タイヤ、廃プラスチックを舗装に利用しない場合、全て発電に使用するとした。使用する廃タイヤ、廃プラスチック量は表-46、47の通りであるので、

表-46 再生資材等のモデル都市内での需要量 (表層)

	単位	ケース3	ケース4	ケース5
		廃タイヤ利用混合物(アスファルトにゴム粉15%)	廃プラ利用混合物(骨材の代替5%)	廃プラ利用混合物(骨材の代替10%)
需要量(容積)	m ³ /yr	29,450	176,700	176,700
表層材密度	t/m ³	2.38	2.22	2.16
需要量(質量)	t/yr	70,091	392,274	381,672
アスファルト	t/yr	3,106	19,966	20,078
粗骨材	t/yr	37,869	186,073	165,258
細骨材・石粉	t/yr	28,568	156,098	156,126
ゴム粉(廃タイヤ)	t/yr	548	0	0
プラ骨材(廃プラ)	t/yr	0	10,038	20,078
備考 (配合) (改質混合物) (ストアス混合物) (ストアス混合物)				
バインダー配合率	質量%	5.5	5.4	5.6
空隙率	容積%	4.0	4.0	4.0
粗骨材	質量%	57.0	50.0	45.7
細骨材・石粉	質量%	43.0	41.9	43.2
ゴム粉(対アスファルト)	質量%	15.0	0.0	0.0
プラ骨材	質量%	0.0	2.7	5.6

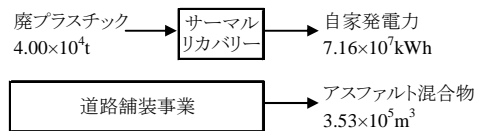
表-47 再生資材等のモデル都市内での需要量 (基層)

	単位	ケース3	ケース4	ケース5
		廃タイヤ利用混合物(アスファルトにゴム粉15%)	廃プラ利用混合物(骨材の代替5%)	廃プラ利用混合物(骨材の代替10%)
需要量(容積)	m ³ /yr	29,450	176,700	176,700
表層材密度	t/m ³	2.37	2.19	2.15
需要量(質量)	t/yr	69,797	386,973	379,905
アスファルト	t/yr	2,812	18,055	18,250
粗骨材	t/yr	47,860	239,514	221,405
細骨材・石粉	t/yr	18,612	101,111	138,390
ゴム粉(廃タイヤ)	t/yr	499	0	0
プラ骨材(廃プラ)	t/yr	0	9,866	19,950
備考 (配合) (改質混合物) (ストアス混合物) (ストアス混合物)				
バインダー配合率	質量%	5.0	4.9	5.0
空隙率	容積%	5.0	5.0	5.0
粗骨材	質量%	72.0	65.0	61.2
細骨材・石粉	質量%	28.0	27.4	38.2
ゴム粉(対アスファルト)	質量%	15.0	0.0	0.0
プラ骨材	質量%	0.0	2.7	5.5

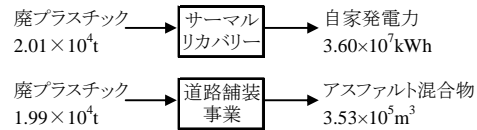
表-48 トラック輸送量と燃料消費量 (再生資材利用)

輸送量(行き先)	単位	ケース3	ケース4	ケース5	輸送距離(設定値)
		廃タイヤ利用混合物(アスファルトにゴム粉15%)	廃プラ利用混合物(骨材の代替5%)	廃プラ利用混合物(骨材の代替10%)	
アスファルト(プラント)	t	0	38,021	38,328	115 km
アスファルト(改質アス工場)	t	5,918	0	0	115 km
ゴム粉(改質アス工場)	t	1,047	0	0	115 km
ゴム粉入りアス(プラント)	t	6,964	0	0	13.5 km
砕石(プラント)	t	132,910	682,796	681,179	57.6 km
プラ骨材(プラント)	t	0	19,904	40,028	115 km
アスファルト合材(現場)	t	139,888	779,247	761,577	13.5 km
軽油消費量					
アスファルト(プラント)	L	0	251,852	253,883	
アスファルト(改質アス工場)	L	39,198	0	0	
ゴム粉(改質アス工場)	L	6,933	0	0	
ゴム粉入りアス(プラント)	L	5,406	0	0	
砕石(プラント)	L	440,197	2,261,421	2,256,066	
プラ骨材(プラント)	L	0	131,841	265,148	
アスファルト合材(現場)	L	108,588	604,890	591,174	
合計	L	600,322	3,250,006	3,366,272	

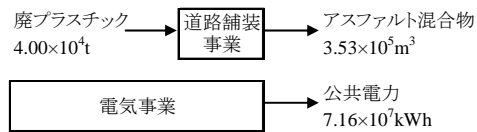
これと廃タイヤ質量当たりの発電量¹³⁾ 2.18×10³kWh/t、廃プラスチック質量当たりの発電量¹⁴⁾ 1.79×10³kWh/tから、これら廃棄物から発電できる電力量が求められる。廃タイヤ、廃プラスチックを舗装に使用する場合、都市内全体で見れば、同じ電力量を公共電力から供給しなければならぬ。従って、比較対象毎に電力量を等しく設定した場合、図-18、19のようになった。



a) ケース1(廃プラは、全て発電用に使用したとした場合)

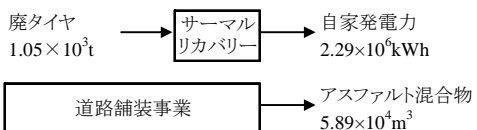


b) ケース4(アスファルト混合物に廃プラを5%使用した場合)

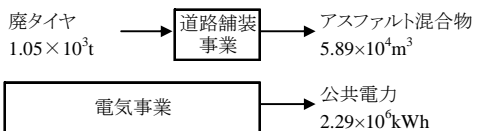


c) ケース5(アスファルト混合物に廃プラを10%使用した場合)

図-18 ストレートアスファルト舗装利用の場合



a) ケース2(廃タイヤは、全て発電用に使用したとした場合)



b) ケース3(アスファルト混合物に廃タイヤを使用した場合)

図-19 改質アスファルト舗装利用の場合

3.3.3 環境負荷原単位の作成

舗装用に使用される資材のほとんどの環境負荷原単位が公表されていない。これらは、詳細な生産方法などを調査することが難しいことから、土木研究所をはじめとして、これまで産業連関表の分析による原単位作成が行われてきた¹⁵⁾。しかし、産業連関法による原単位は、貨幣価値に基づき環境負荷を按分して求めたもので、様々な資材の総合物である大きな構造物の評価には有効であるが、同じ種類の資材同士を比較したり、舗装のような比較的資材の種類が少ない場合には実際との相違が大きくなる場合が多い。そこで、本検討では積み上げ法により原単位作成を行うことにした。

積み上げ法による原単位の作成は、各資材の原料調達・製造に係るエネルギー等を詳細に調査することにより実施した。結果を以下に示す。なお、舗装に関する原

単位を作成する場合、利用可能な公表データが非常に少なく、適宜ヒアリング等を行い、データを補充した。このため、ここに示す結果は、必ずしも平均的な値となっていない場合もある。

(1) 燃料等の原単位

電力燃料等の原単位は、(財)産業環境管理協会のLCA算出ソフトJEMAI-LCAの値を用いた。表-49に値を示す。

(2) アスファルトの原単位

アスファルトの環境負荷原単位の算出結果を表-50に示す。算出にあたっては、原油生産から輸送、精油所での精製を考慮する必要があるが、石油精製によりアスファルトだけが生産される訳ではなく、複数の製品が同時に生産される。これらの製品に環境負荷を相応に負担させるが、全てが目的物であるため、負担率を簡単に決定できない。ここでは全ての石油製品を等分の負担率にして計算することにした。アスファルトの原油張込流量2.0%、原油100Lに対して全石油精製物の合計は91.4Lであることから、アスファルトの環境負荷の負担は、全体の2.2% (=2.0÷0.914) である。原油1kLから得られるアスファルトは20.8kg程度であるので、石油製品全体の各環境負荷量に2.2%/20.8kgを掛け合わせることで環境負荷原単位を求めた。

改質アスファルトII型の生産に係わる環境負荷原単位の算出結果を表-51に示す。算出にあたっては、主な改質材であるSBS(スチレンブタジエンスチレン)の原単位が必要となるが、公表されているデータはない。しかし、SBSと製法に共通点の多いSBR(スチレンブタジエンゴム、合成ゴム)の原単位が公表されていたので、これをSBSの原単位として使用した。また、改質アスファルトの生産にあたってアスファルトとSBSを混合する工程が必要であったため、ヒアリング調査を行い、国内の主

表-49 燃料等の環境負荷原単位

	エネルギー量 (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)	SO _x 排出量 (kg-SO _x)	NO _x 排出量 (kg-NO _x)	SPM排出量 (kg-SPM)	出典
電力 kWh	9.09E+00	4.00E-01	5.17E-05	1.62E-04	1.72E-06	JEMAI-LCA
ガソリン L	3.51E+01	2.47E+00	7.57E-05	7.61E-04	8.62E-05	JEMAI-LCA
軽油 L	3.82E+01	2.69E+00	8.24E-05	8.29E-04	9.39E-05	JEMAI-LCA
重油 L	3.91E+01	2.77E+00	1.30E-05	8.07E-04	9.50E-05	JEMAI-LCA

表-50 アスファルトの環境負荷原単位

	エネルギー量 (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)	SO _x 排出量 (kg-SO _x)	NO _x 排出量 (kg-NO _x)	SPM排出量 (kg-SPM)	出典
石油製品合計						
原油生産 kL	9.44E+02	5.24E+01	7.23E-01	1.15E-01	-	「石油製品のLCIデータの概要」石油連盟、平成15年1月
原油輸送 kL	4.63E+02	3.15E+01	6.87E-01	8.51E-01	-	
石油製品生産 kL	2.68E+03	1.50E+02	1.43E-01	1.16E-01	-	
石油製品合計 kL	4.09E+03	2.34E+02	1.55E+00	1.08E+00	-	
アスファルト(=合計×2.2%/20.8kg) kg	4.33E+00	2.48E-01	1.64E-03	1.14E-03	-	

表-51 改質アスファルトII型の環境負荷原単位(輸送除く)

	エネルギー量 (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)	SO _x 排出量 (kg-SO _x)	NO _x 排出量 (kg-NO _x)	SPM排出量 (kg-SPM)	出典	
改質アスファルトIあたり							
フラッシュ重油(L)	6.50	2.54E+02	1.80E+01	8.45E-05	5.25E-03	6.18E-04	日本改質アスファルト協会へのヒアリング調査結果
灯油(L)	6.50	2.48E+02	1.75E+01	5.36E-04	5.39E-03	6.10E-04	
電力(kWh)	89.00	8.09E+02	3.56E+01	4.60E-03	1.44E-02	1.53E-04	
原材料							
アスファルト(t)	0.95	4.11E+03	2.35E+02	1.56E+00	1.09E+00	-	上記計算より
改質剤(SBS)(t)	0.05	3.70E+02	1.50E+02	1.58E-06	6.65E-05	1.97E-05	JEMAI-LCAのSBRの値を適用
小計(1tあたり)		5.79E+03	4.57E+02	1.57E+00	1.11E+00	-	
改質アスファルトII型 kg		5.79E+00	4.57E-01	1.57E-03	1.11E-03	-	

表-52 砕石の環境負荷原単位(輸送除く)

	エネルギー量 (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)	SO _x 排出量 (kg-SO _x)	NO _x 排出量 (kg-NO _x)	SPM排出量 (kg-SPM)	出典	
砕石3500tあたりの消費量							
重機 軽油(L)	263.55	1.01E+04	6.51E+02	2.00E-02	2.01E-01	2.27E-02	砕石工場へのヒアリング調査結果より
消費 ガソリン(L)	232.05	8.15E+03	5.73E+02	1.76E-02	1.77E-01	2.00E-02	
電力(kWh)	4861.50	4.42E+04	1.94E+03	2.51E-01	7.88E-01	8.36E-03	
小計(3500tあたり)		6.24E+04	3.17E+03	2.89E-01	1.16E+00	5.11E-02	
砕石生産 (=合計/3500t) t		1.78E+01	9.05E-01	8.25E-05	3.33E-04	1.46E-05	

表-53 ゴム粉の生産に関する環境負荷原単位

	エネルギー量 (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)	SO _x 排出量 (kg-SO _x)	NO _x 排出量 (kg-NO _x)	SPM排出量 (kg-SPM)	備考
ゴム粉生産 (ビートワイヤ除去、切断、破碎、粉碎)	7.80E-01	3.00E-02	4.45E-06	1.39E-05	1.48E-07	電力消費量 0.086kWh/tより算出

表-54 再生POペレットの生産に関する環境負荷

	エネルギー量 (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)	SO _x 排出量 (kg-SO _x)	NO _x 排出量 (kg-NO _x)	SPM排出量 (kg-SPM)	出典
再生POペレット(kg)	7.14E+00	5.90E-01	1.78E-05	1.86E-04	1.62E-05	JEMAI-LCA

表-55 アスファルト混合物生産に関する燃料等の消費

	ストレートアスファルト合材	改質アスファルト合材	再生アスファルト合材
生産割合	15 %	15 %	70 %
燃料消費率※1	100 %	115 %	110 %
電力消費率※1	100 %	100 %	110 %
重油消費量 L/t	8.88	10.21	9.77
電力消費量 kWh/t	4.11	4.11	4.52

※1燃料消費率、電力消費率は、ストレートアスファルト合材を100%とした場合の数値

要な改質アスファルトメーカー6社のプラント運転状況の平均値をプラント消費量として環境負荷原単位を求めた。

(3) 砕石の原単位

砕石の環境負荷原単位の算出結果を表-52に示す。砕石についても公表されたデータがなく、適当な統計値も見あたらなかったため、ヒアリング調査を行い、製造に係る電力・燃料消費量について聴取することができた採石工場(規模:3500t/日)1工場のデータから求めた。

(4) 廃タイヤ再生資材(ゴム粉)に係わる原単位

廃タイヤ再生資材の環境負荷原単位の算出結果を表-53に示す。廃タイヤからゴム粉を生産するプロセスは、「ビートワイヤ除去」、「切断」、「破碎」、「粉碎」の4つの工程からなる。公表されたデータが見あたらなかったため、ヒアリング調査を行い、製造に係る電力・燃料消費量について聴取することができた1工場のデータから求めた。2tあたりビートワイヤ除去11kWh、切断11kWh、破碎75kWh、粉碎75kWhであったので、質量当たりの

表-56 舗装工に関する環境負荷原単位

	エネルギー量 (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)	SO _x 排出量 (kg-SO _x)	NO _x 排出量 (kg-NO _x)	SPM排出量 (kg-SPM)	備考
舗装工	4.63E+00	3.26E-01	9.99E-06	1.00E-04	1.14E-05	軽油消費量 0.121L/m ² より 算出

表-57 廃タイヤ発電に関する環境負荷原単位

	エネルギー量 (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)	SO _x 排出量 (kg-SO _x)	NO _x 排出量 (kg-NO _x)	SPM排出量 (kg-SPM)	出典
廃タイヤ発電 (t当たり)	3.32E+04	1.77E+03	-	-	-	※1 文献16) ※2 文献17)

表-58 廃プラスチック発電に関する環境負荷原単位

	エネルギー量 (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)	SO _x 排出量 (kg-SO _x)	NO _x 排出量 (kg-NO _x)	SPM排出量 (kg-SPM)	出典
廃プラ発電 (t当たり)	2.93E+04	2.83E+03	1.40E-01	1.63E+00	-	※1 文献16) ※2 文献14)

消費電力を(11kWh+11kWh+75 kWh +75kWh) ÷ 2t = 0.086kWh/t として計算した。

(5) 廃プラスチック骨材の生産に係わる原単位

再生 PO ペレットの生産に関する環境負荷原単位の値を表-54 に示す。廃プラスチック骨材については、再生プラスチックペレットの生産と同様の工程で生産されるものと仮定し、「再生POペレット」として公表されているデータを流用した。

(6) アスファルト混合物生産に係わる原単位

アスファルト混合物生産に関する原単位を表-55 の下段に示す。アスファルト混合物生産における原単位については、(社)日本アスファルト合材協会より、混合物1 tあたりの資源消費の統計値(電力消費量 10.2kWh/t、重油消費量 9.7Lt) が公表されている。しかし、これは新規合材、再生合材、再生骨材の生産が全て混ざったものであり、これらを分離しないと使用できない。

そこで、まず、いくつかのプラントに対しヒアリング調査を行い、再生骨材の生産を除いた資源消費を調査したところ、回答が得られた3プラントにおける重油/電力比の平均値は 2.2 となった。重油消費が全て合材生産に使用されたとすれば、統計値の重油消費量から合材生産分のエネルギー消費が求められ、電力消費 4.4kWh/t、重油消費 9.7Lt となった。これをもとにして、さらに表-55 に示すようにストレートアスファルト合材、改質アスファルト合材、再生合材の3つの生産割合、燃料消費率、電力消費率を設定し、それぞれの資源消費を求めたところ、表-55 の下段の値となった。各種合材生産の環境負荷原単位は表-49 と表-55 から求めて使用した。

(7) 舗装工事に係る原単位

舗装工(表層、基層の施工)で使用する重機は、国土交通省「土木工事標準積算基準書」を基に、アスファルトフィニッシャー(ホイール型 2.4~6.0m)、ロードローラ、タイヤローラを各1台とした。ただし、舗装は2層とし

て計上した。

- 1日の燃料(軽油)消費量=65+35+41=141(L)
- 1層 1000m²あたりの施工日数=1/2.300=0.43日
- 1層 1000m²あたりの燃料(軽油)消費量
=141×0.43=60.6(L/1000m²)
- 2層 1000m²あたりの燃料(軽油)消費量
=60.6×2=121.2(L/1000m²)

これらより、舗装工に係わる軽油消費原単位は 0.121(L/m²) となることから、環境負荷原単位は表-56 のようになった。

(8) 廃棄物発電に係わる原単位

廃タイヤ、廃プラスチックによる発電に係わる原単位としては、様々な文献¹⁴⁾¹⁶⁾¹⁷⁾に分散していたので、これらを収集して、表-57, 58 のように設定した。ただし、廃タイヤ発電に関しては、エネルギー量、CO₂排出量以外の原単位について情報が得られなかったため、これら二つのみとなっている。

3.3.4 再生資材利用舗装の環境負荷量の算定

上記までの調査を基に、廃ゴム、廃プラスチックを舗装に使用した場合の環境負荷量を算定した。結果を表-59 に示す。各環境負荷量を比較すると、エネルギー量、CO₂排出量と比べて、SO_x、NO_x排出量は概ね3桁以上小さく、また SPM では概ね4桁以上小さい。これらの指標は数値が小さいばかりでなく、一部には原単位が収集できずに、未計上の部分もあるため、考察はエネルギー量、CO₂排出量に絞って行うこととした。

エネルギー消費量およびCO₂排出量について図示すると図-20 のようになった。なお、通常材舗装である、ケース1とケース2はアスファルトの違いだけであるが、使用条件や寿命の設定などを簡略化して設定しているため、実際と異なることも予想される。このため、直接の比較は行わない。

廃プラスチック利用舗装のケース4、5は、ストレートアスファルトタイプ利用であることからケース1と比較する。図-20、21 より、舗装部分(材料、舗装工、輸送)で見ると廃プラスチックを利用することによりエネルギー消費、CO₂排出量ともに増大している。しかし、トータルで見ると、サーマルリカバリーによる発電の負荷が大きくなり、廃プラスチック利用舗装の環境負荷は小さくなっている。

廃ゴム利用舗装のケース3では、改質アスファルトタイプの利用であるため、ケース2と比較する。図-20、21

より、舗装部分だけを見ても改質アスファルトを利用するよりゴム粉を利用したほうがエネルギー消費、CO₂ 排出量が若干減少している。これは、改質アスファルトに用いられる改質材（SBS）の原単位（表-51）が大きいのに対し、ゴム粉はリサイクル品のため原料の調達などが環境負荷として含まれず、原単位（表-53）が小さいためと考えられる。サーマルリカバリーによる発電まで考慮すると、環境負荷低減効果はさらに大きくなった。

これらの結果より、廃タイヤ、廃プラスチックを利用した舗装では、舗装部分だけを見ると環境負荷が増大している場合もあるが、舗装以外での利用までを考慮するとトータルでは環境負荷が減少する可能性があることが示された。

なお、これらの結果は、廃プラスチック利用舗装はストレートアスファルトを用いた舗装と同じ耐久性、廃ゴム（ゴム粉）利用舗装は改質アスファルトⅡ型を用いた舗装と同じ耐久性があり、通常の舗装と同様にリサイクル可能と仮定した場合であり、舗装に利用しない場合は、サーマルリカバリーに使用するとした場合に得られる結果である。

3.3.5 廃タイヤ・廃プラスチック利用舗装のまとめ

本研究では、再生資材利用の舗装の環境負荷を評価することを目的に、国内の平均的な都市内で利用した場合を想定し、LCA 評価を行った。その結果、廃タイヤ、廃プラスチックを利用した舗装では、舗装部分だけを見ると環境負荷が増大している場合もあるが、舗装以外での利用まで考慮するとトータルでは環境負荷が減少する可能性があることが示された。

本研究で得られた主な知見をまとめると次のとおりである。

- (1) 舗装に関する環境負荷原単位は、アスファルトをはじめとしてほとんど整備されておらず、LCA 分析を行う際に、多くの原単位作成を行わなければならない。
- (2) 再生資材の原単位も整備が不十分であり、統計的なデータも不足しているため、生産方法の聞き取り調査などから原単位作成を行う必要がある。
- (3) 廃プラスチックをアスファルト混合物層へ利用する場合は、舗装に関する部分では環境負荷は増大するが、舗装以外での利用まで考慮すると、トータルでは環境負荷が減少する可能性が示された。
- (4) 廃ゴムは改質アスファルトと同程度の性能が得られれば、わずかではあるが環境負荷を低減させら

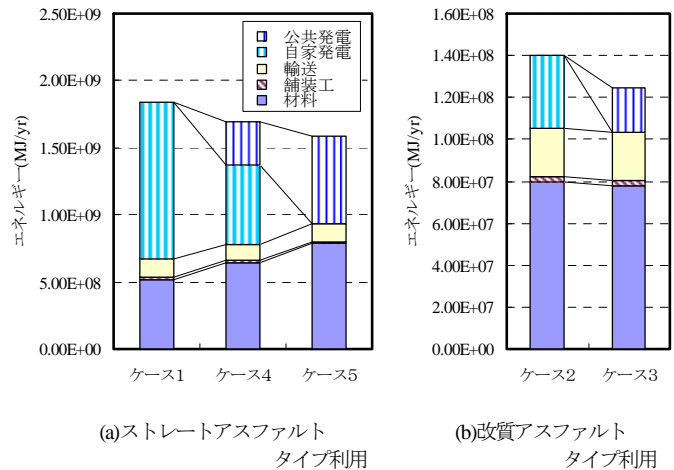


図-20 エネルギー消費量の算出結果

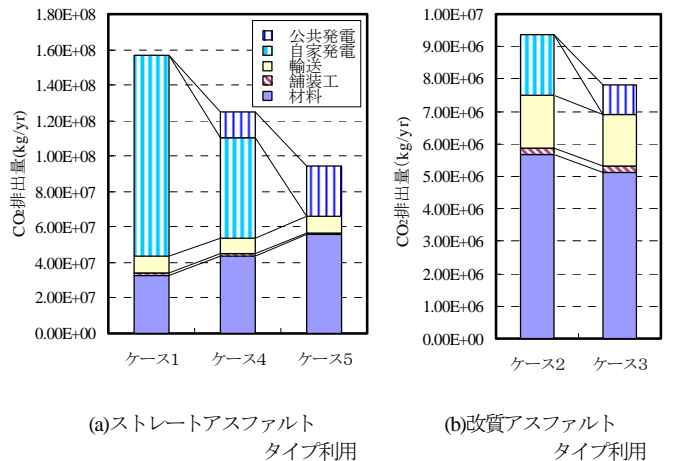


図-21 CO₂排出量の算出結果

表-59 環境負荷の算出結果

		エネルギー量 (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)	SO _x 排出量 (kg-SO _x)	NO _x 排出量 (kg-NO _x)	SPM排出量 (kg-SPM)
ケース1	材料計	5.16E+08	3.30E+07	6.88E+04	5.45E+04	7.23E+02
	舗装工	1.64E+07	1.15E+06	3.53E+01	3.55E+02	4.02E+01
	輸送(軽油)	1.36E+08	9.56E+06	2.93E+02	2.95E+03	3.34E+02
	自家発電	1.17E+09	1.13E+08	5.60E+03	6.53E+04	0.00E+00
	公共電力	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
ケース2	材料計	7.95E+07	5.69E+06	5.79E+03	5.48E+03	2.10E+02
	舗装工	2.73E+06	1.92E+05	5.88E+00	5.92E+01	6.70E+00
	輸送(軽油)	2.29E+07	1.61E+06	4.93E+01	4.96E+02	5.61E+01
	自家発電	3.49E+07	1.86E+06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	公共電力	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
ケース3	材料計	7.77E+07	5.11E+06	5.17E+03	4.86E+03	1.39E+02
	舗装工	2.73E+06	1.92E+05	5.88E+00	5.92E+01	6.70E+00
	輸送(軽油)	2.29E+07	1.61E+06	4.95E+01	4.98E+02	5.64E+01
	自家発電	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	公共電力	2.08E+07	9.16E+05	1.18E+02	3.71E+02	3.94E+00
ケース4	材料計	6.40E+08	4.37E+07	6.31E+04	5.40E+04	1.04E+03
	舗装工	1.64E+07	1.15E+06	3.53E+01	3.55E+02	4.02E+01
	輸送(軽油)	1.24E+08	8.74E+06	2.68E+02	2.69E+03	3.05E+02
	自家発電	5.89E+08	5.69E+07	2.81E+03	3.28E+04	0.00E+00
	公共電力	3.24E+08	1.42E+07	1.84E+03	5.77E+03	6.12E+01
ケース5	材料計	7.85E+08	5.57E+07	6.40E+04	5.81E+04	1.37E+03
	舗装工	1.64E+07	1.15E+06	3.53E+01	3.55E+02	4.02E+01
	輸送(軽油)	1.29E+08	9.06E+06	2.77E+02	2.79E+03	3.16E+02
	自家発電	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	公共電力	6.51E+08	2.86E+07	3.70E+03	1.16E+04	1.23E+02

れる可能性が示された。

また、今回の検討では、以下に示すいくつかの課題があり、今後これらの解決が必要と考えられた。

- (5) 廃プラ、廃ゴムを利用した舗装の耐久性の確認
- (6) 廃プラ、廃ゴムを利用した舗装がリサイクル不可能な場合は、環境負荷が増大するため、リサイクルの可否の確認
- (7) 輸送距離の設定の妥当性の確認

4. まとめ

本研究では、熔融スラグ等の舗装への適用性の評価方法を作成することを目的に、評価方法を作成するとともに、熔融スラグ等（非鉄金属スラグ、ゴミ熔融スラグ、廃プラスチック、廃タイヤ）の舗装への適用性について評価を行った。主な成果は以下のようである。

- (1) 環境負荷の評価については、LCAの手法を取り入れ、標準的な評価実施方法を作成した。これについては、LCAの計算プログラムも作成し、できるだけ簡便に評価が実施できるようにした。
- (2) 再生材料等の環境安全性を評価するにあたり必要となる舗装資材がライフサイクルにおいて晒される環境条件について整理し、用途に応じて、評価項目が検討できるようにした。
- (3) 非鉄金属スラグ（Fe-Ni スラグ、Cu スラグ）の舗装への適用性について評価を行い、輸送距離の短い箇所での適用で、環境負荷低減効果が得やすいことが分かった。
- (4) ゴミ熔融スラグの舗装への適用性について評価を行い、ゴミ焼却灰を資源化するために灰熔融すると考えた場合、環境負荷を増大させている可能性があり、特に燃料式熔融炉での環境負荷が大きいことが分かった。しかし、現在までのところ土地改変の影響などが十分評価できず、最終処分場の評価が十分ではない可能性があるため、さらに検討を要するものと考えられた。
- (5) 廃プラスチック・廃タイヤの舗装への適用性について評価を行い、舗装事業だけで捉えると環境負荷を増大させる可能性もあるが、廃プラスチック等を舗装に利用しない場合も含めて評価すると、環境負荷を低減効果があることが分かった。

環境保全調査報告書(平成 14 年度版)、(社)土木学会、2003

- 2) 日本産業機械工業会エコスラグ利用普及センター：循環社会の輪をつなぐごみと下水の熔融スラグ(エコスラグ)有効利用の課題とデータ集(2005 年度版)、(社)日本産業機械工業会エコスラグ利用普及センター、2005.12
- 3) 環境省：循環型社会白書(平成 17 年版)、2005
- 4) 廃棄物研究財団：スラグの有効利用マニュアル、(財)廃棄物研究財団、1999.11
- 5) 田中信壽：廃棄物物理立処分場の建設と管理、技報堂出版、2000.2
- 6) 国立環境研究所：環境負荷原単位データブック(3EID)、
<http://www.cger.nies.go.jp/publication/D031/index.html>
- 7) 産業環境管理協会：JEMAI-LCA Pro ver.2.1.2、(財)産業環境管理協会、CD-ROM、2005.11
- 8) (社)日本自動車タイヤ協会：タイヤリサイクルハンドブック、p.25、2007
- 9) (社)プラスチック処理促進協会：プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分の状況、p.3、2007.12
- 10) 日本道路協会編：舗装の構造に関する技術基準・同解説、日本道路協会、p.59、2002.7
- 11) R. Souza、姫野、平川、小澤：乗用車タイヤゴム粉を添加した AR 密粒度混合物の性状、土木学会第 60 回年次学術講演会、2005.9
- 12) 小野、向後、姫野：アスファルトラバーを用いた密粒度混合物の疲労破壊特性、土木学会第 61 回年次学術講演会、2006.9
- 13) ブリヂストン：社会・環境報告書 2005、p.66、2005.7
- 14) プラスチック処理促進協会：プラスチック製容器包装の処理に関するエコ効率分析 2006 年度、p.102、2006.9
- 15) 例えば、片脇、寺田：資源・エネルギー消費、環境負荷の算定手法の開発と実態調査報告書(その 2)、土木研究所資料、第 3256 号、1994.3
- 16) 資源エネルギー庁：総合エネルギー統計 2006 年度、2008.5
- 17) 環境省、経済産業省：温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル、p.II-62、2008.5

参考文献

- 1) 土木学会：広域最終処分場計画調査 廃棄物海面埋立

A STUDY ON THE APPLICABILITY OF MOLTEN SLAG TO PAVEMENT MATERIALS

Abstract : Recently, the development of the recycled resource such as molten slag is active in the background of effective use of the resource and the depletion of the final disposal dump, etc. Especially, the development of the technology used for the pavement of those recycled resources is active. Using these recycled resources comes to recycle certainly. However, whether it has contributed to the environmental load decrease in total until abandoning since using these manufactures it is not clarified. Then, the evaluation method was made to evaluate the environmental friendliness of pavement used waste materials. The calculation program was made to assist the execution of the evaluation method. Various environmental conditions in the life cycle of the pavement material were arranged to examine environmental requirements of the pavement material. Various waste material pavement namely molten slag, scrap tire and waste plastics pavement were evaluated by the environmental evaluation method.

Key words : Asphalt, Pavement, Recycle, Molten slag, Scrap tire, Waste plastics, LCA