

舗装発生材のリサイクルによる二酸化炭素排出と
建設コストの低減効果について

Reduction effect of the carbon dioxide emission
and the construction cost in pavement waste recycling

天野耕二 * ○牧田和也 **
Koji AMANO * Kazuya MAKITA **

ABSTRACT : It has become significant to illustrate the environmental load emissions and the costs by waste recycling system, and to improve the actual recycling processes in various industries. Objective of this study is to evaluate the carbon dioxide emission and costs in the construction processes of new and recycled pavement. Three kinds of materials (asphalt, cement, and aggregate) are put into road building. We reached the recycling effects in the carbon dioxide emission and construction costs by applying these materials to some model cases of the traffic volume. The following results were obtained in this study. ①Recycling of pavement waste asphalt is effective for reducing 56% of carbon dioxide emission. ②Recycling of pavement waste aggregate increases carbon dioxide emission but it is greatly effective for saving resources consumption. ③While the recycled asphalt pavement is expected to have some advantages in reducing carbon dioxide emission and construction costs, it was founded the recycled concrete pavement to increase carbon dioxide emission and construction costs.

KEYWORDS : construction waste, recycling pavement, carbon dioxide emission, construction cost

1、はじめに

温暖化をはじめとする地球環境問題に対する関心が高まるとともに、資源の有効利用という観点からも廃棄物リサイクルへの認識は急速に高まってきている。また最終処分場の不足、新規処分場建設が困難である点など、ハード・ソフトの両面からリサイクルにかかる期待は大きい。この傾向は再生利用という点においては比較的先行していた舗装分野についても同様であり、建設省が平成3年10月の「再生資源の利用の促進に関する法律（リサイクル法）」の施行を受けて「リサイクルプラン21」を策定し、建設副産物の発生抑制と再利用率の向上をうながすなど、さらなるリサイクルへの取り組みが求められている。しかし反面、リサイクルによって新たなコスト増や環境負荷の発生なども考えられることから、リサイクルが必ずしも経済的で環境面で優位であるとは言い切れない。このようなことが起こる原因としては回収・再生プロセスの未整備、非効率やリサイクル促進による過剰供給などが考えられる。

道路建設部門において今後予想される舗装道路の維持・修繕事業の増大にともなって舗装発生材の供給が促進されることは明白であり、これら建設廃棄物の再利用の促進と適正処理の徹底を、社会情勢に適した形で進めていくことが今後求められるところである。すなわち、リサイクルシステムについてもコストおよび環境負荷排出状況の把握、問題点の

表1 燃料種別二酸化炭素排出原単位

燃料種別	unit	CO ₂ 排出原単位 (kg-c)
灯油	l	0.6896
軽油	l	0.7212
A重油	l	0.7357
B重油	l	0.7725
C重油	l	0.8016
液化石油ガス (LPG)	kg	0.8200
石油コークス	kg	0.9020
コークス製造用炭	kg	0.7046
除、コークス製造用炭	kg	0.7046
石炭コークス	kg	0.8856
コークス炉ガス	立m	0.2208
高炉ガス	立m	0.2392
転炉ガス	立m	0.4184
電気炉ガス	立m	0.4184
液化天然ガス (LNG)	立m	0.7331
都市ガス	立m	0.5839
電力	kwh	0.1100
石灰石	kg	0.1200
炭化水素油	l	0.8624
セメント焼成炉	生産 t	122

*立命館大学理工学部 Department of Civil and Environmental Engineering , Ritsumeikan University

**立命館大学大学院理工学研究科 Department of Civil and Environmental Engineering , Ritsumeikan University

提示・改善などに努め、よりよい形でリサイクルを推進すると同時に多種多様な道路構造に対応できる形で原単位を整備し、道路構造を多面的に評価する必要がある。

このような状況の中で、舗装材料について中野ら¹⁾は廃アスファルトコンクリートのリサイクル効果を再生品目別に算出し、再生により二酸化炭素、窒素酸化物等の環境インパクトを半減することができると述べている。また岩渕ら²⁾は路盤材のリサイクル効果について検討し、リサイクルによって逆に二酸化炭素排出は増加するという結果を示している。道路構造物としての環境負荷評価については、加藤ら³⁾が道路構造代替案による供用後の利用状況変化を考慮したLCAを行っている。しかし、実際の施工では工法や構造が環境への負荷というよりむしろ建設コストなどの経済性を考慮して決定される場合が多いことから、環境負荷のみ、建設コストのみといった一側面ではなく両者を組み合わせた総合的な評価が求められるべきであろう。

本研究では、代表的なインフラ施設であると同時に建設廃棄物排出源でもある舗装道路建設活動について、道路の構成材料である舗装材（アスファルト混合物、セメントコンクリート）と路盤材（クラッシャーラン、粒度調整碎石）に着目して新規製造と再生製造での材料生産時における環境負荷排出量の低減効果を定量評価する。また、その材料を用いて実際に舗装工事を行った場合の環境負荷排出量についても、交通量区分別（3パターン）に設定した単位面積あたりのモデルケースに適用し、舗装構造と環境負荷排出量の関係について検討する。さらに、建設コストについても一般的な積算法を用いて新規・再生材を使用した工事費の比較を行うことにより、環境負荷排出・建設コスト両面から各種の舗装構造を検討し、道路舗装に関わるリサイクル効果の現状把握と問題提議を試みる。なお対象とする環境負荷は主に二酸化炭素とし、対象年度は1995年度とする。

2、研究の内容

2.1 分析方法

本研究では、舗装種ごとの比較およびリサイクル材使用による効果などのミクロな点に特に着目し、ライフサイクルアセスメント（LCA）の概念に従って各製造プロセスごとに環境負荷量の積み上げ計算を行った。なお二酸化炭素排出量原単位は環境庁の調査報告書⁴⁾の値を、道路舗装に関わる使用材料生産量および消費燃料等は関係各団体発行資料の1995年度の値を用いた。本研究で用いた二酸化炭素排出原単位を表1に示す。また、工事費の積算には建設物価調査会発行の97年12月版建設物価⁵⁾等を用いて行った。

2.2 対象プロセス

各材料の製造プロセスフローに従って燃料使用による二酸化炭素排出と、セメントおよび鉄生産工程での石灰石焼成時に発生する二酸化炭素排出を考慮した。セメントについては石灰石・珪石・骨材生産および混合工程を、アスファルト混合物についてはアスファルト・骨材生産・混合工程を、路盤材については材料投入・破碎・分級工程を対象として二酸化炭素排出量を計算した。また、各再生材については廃材回収から再生品製造工程までを考慮した。図1に対象プロセスのフロー図を示す。

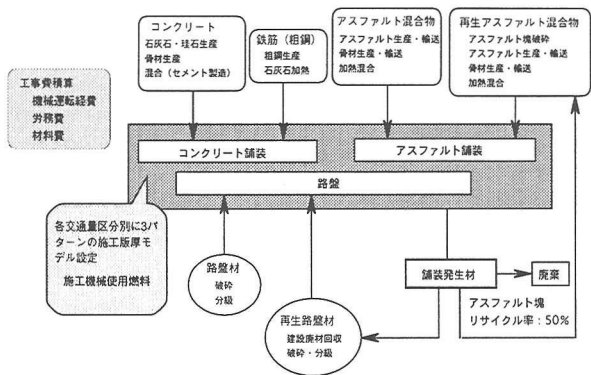


図1 対象プロセスのフロー図

3、各舗装材料の二酸化炭素排出量原単位

各材料別に製造1tあたりの二酸化炭素排出量（燃料消費および石灰石起源）を算出した。結果を図2～4に示し、各材料の原単位の設定概要を以下に述べる。なお、本研究では対象プロセスを国内に限定したため、石

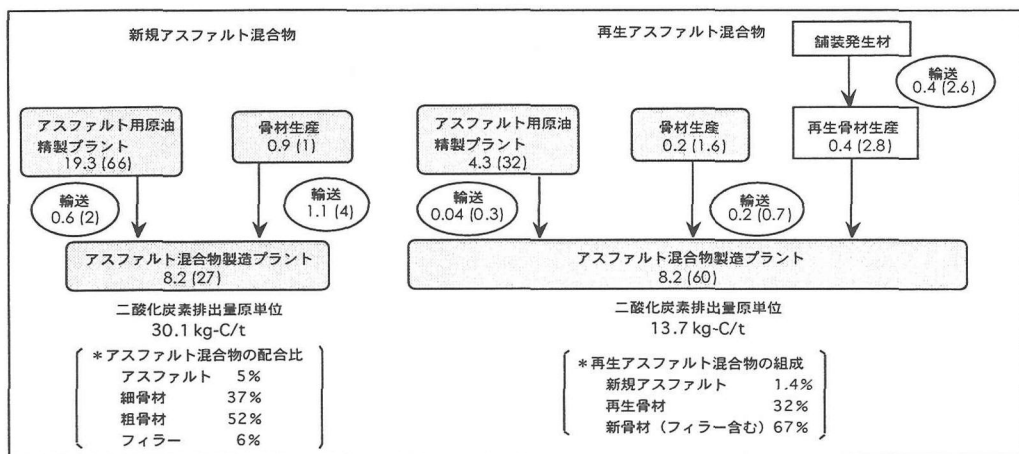


図2 新規および再生アスファルト混合物生産1tあたりの二酸化炭素排出量

油・石炭等エネルギー資源および鉄鉱石における採掘・輸入に伴うプロセスを省略した。

3.1 アスファルト混合物

精油所で精製されたアスファルトは一旦アスファルト専用タンカーにより油槽所に運搬され、さらにそこからローリーによって混合所に運搬し、骨材と混合する。これらの混合物製造までにかかるプラントでのエネルギー消費⁶⁾および輸送を考慮する。ここで、原油精製プロセスの二酸化炭素排出量をアスファルト混合物用原油に割り振る際の割り振り方は次の通りである。平成7年度石油精製業者が使用したエネルギーによる二酸化炭素排出量は10Mt-Cである。全原油輸入量のうち、アスファルト製造用原油は14% (36,214千kl) であり、主目的は道路用アスファルト製造であることから、この精製分エネルギーはすべてアスファルト製造目的で使用されたとしてすべて背負わせることとする。また残りのエネルギー86%のうち、アスファルト得率は2.39%であることからこれを背負わせ、以上2点をアスファルト製造関連エネルギーとする。このうち、アスファルト混合物に用いられたアスファルトは、他の道路用途使用分と建築防水用等をのぞいた68%であることから、これをアスファルト混合物用アスファルト製造に関する二酸化炭素排出であるとして算出を行った。ここで、アスファルト混合物の組成は平均的な値⁷⁾を用いることとし、数値を図2中に示す。

3.2 再生アスファルト混合物

再生骨材の混合割合は品質によって異なるが、生産実績データと再生骨材投入実績データより、平均値として重量比32%とした⁸⁾。また日本アスファルト協会によると再生アスファルト混合物中に含まれる新規アスファルトは重量比1~2% (平均1.4%) である⁹⁾。よって残り67%は、新規骨材分であるとする。現場で発生するアスファルト塊の再生プラント (または中間処理プラント) への輸送は20kmとした。ここでは再生骨材製造に伴う舗装の解体は考慮していない。製造プロセスと二酸化炭素排出量を図2に示す。

3.3 コンクリート

図3に示すように、セメントは石灰石と珪石の原料生産工程および原料混合工程を、コンクリートについては碎石骨材の製造工程を考慮する⁸⁾。このときの二酸化炭素排出量は、環境庁調査報告書において石灰石の品質が一定で含

(注意) 図2~4について

注1) 新規製造に関わるもの
再生に関わるもの

注2) 単位はすべてkg-C () 内は構成比 (%)

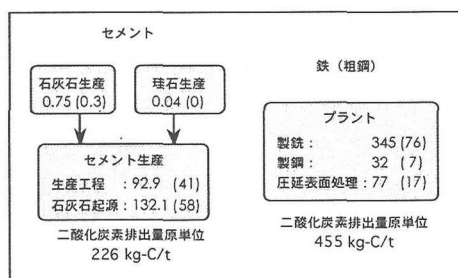


図3 セメントおよび鉄 (粗鋼) 生産1tあたりの二酸化炭素排出量

まれるすべての炭素（C）が二酸化炭素（CO₂）に変化したと仮定して計算されているため、ここでもこれを用いることにする。なお、セメント製造においてその原料の75%を占める石灰石は、その産地が日本各地に点在しておりセメント工場と隣接していること、二酸化炭素排出量原単位が比較的大きな値となっていることなどから、石灰石・珪石の輸送に伴う影響が大きくないと判断できるため、ここではこれらを考慮しない。

3.4鉄

鉄を製造する工程は製銑、製鋼、圧延表面処理工程の3つに分けられる。考慮するのは粗鋼製造に投入されたエネルギー起源と原料に使う石灰石起源の二酸化炭素排出量とする¹⁰⁾。なお輸送および鉄鉱石や石炭等の採掘・選別等は考慮しない。結果を図3に示す。

3.5路盤材

道路用砕石は原石山から岩石をおもに露天採掘法により採掘し、破砕設備までダンプトラック等で運搬してプラントで破砕分級することにより得る。全国の砕石工場での全砕石生産量は95年データで4億1,033万トンである（コンクリート用等の用途を含む）¹¹⁾。使用電力及び燃料（灯油、軽油、重油）から生産1tあたりの二酸化炭素排出量原単位を計算した。結果を図4に示す。

3.6再生路盤材

再生路盤材は、舗装発生材等の建設廃材を不純物が混入しないように分別回収を行い、中間処理施設に運搬して破砕分級作業を経て再生骨材とした後、混合プラントで生産される。これらの作業は一連の作業として実施されるのが普通であるが、区分の明確化のため別々に積算されている¹²⁾。よって二酸化炭素排出量の計算もこの方法に従って行うこととする。なお現場でのとりこわし作業はその構造物自体の責任で行われるものと考えて考慮しない。舗装発生材の輸送については再生アスファルト混合物製造時と同様に考える。結果を図4に示し、詳細な算出過程を以下に示す。

（1）アスファルト塊からの再生

廃材ヤードから原石ホッパを通じスクリーンに至るまでを処理とし、選別するスクリーンから製品（再生骨材）ヤードまでを分別、再生路盤材の製造を混合としてそれぞれの工程について積算法に従って使用燃料・電力を計算した。プラント処理能力は最も標準的な60 t/hとする。実際はこれらの工程の中で品質上の問題から補充材の混入が行われ、再生材料もアスファルト塊のみではなく他の建設廃材の投入も行われる。また、再生工程中に細粒分が多く発生するため再生原料投入以降に重量ロスが考えられるが、本研究では考慮しない。

（2）コンクリート塊からの再生

持ち込まれたコンクリート塊の破砕分級作業と異物除去作業を処理工程、それ以降の混合プラントを用いて製造する過程は再生利用工程として仕分けして積算を行う。その他はアスファルト塊の再生と同様である。

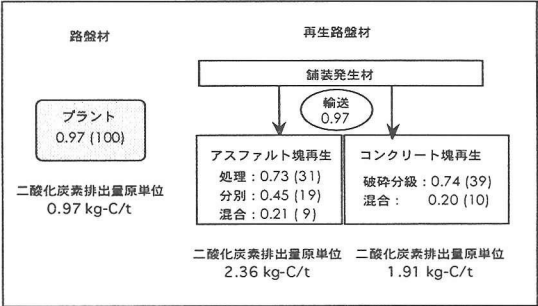


図4 新規および再生路盤材生産1tあたりの二酸化炭素排出量

4、各舗装材料別二酸化炭素排出量の比較

図2より、95年度新規アスファルト混合物生産における総二酸化炭素排出量は1,570（千t-C）で、1tあたりの二酸化炭素排出量原単位は30.1（kg-C/t）となった。アスファルト生産およびアスファルト混合物生産工程からの二酸化炭素排出の比重が大きく、それぞれ66%、27%を占めておりこの2つの工程で全排出量の9割を占めている。輸送および骨材生産においては全体に占める割合は小さい。

再生アスファルト混合物生産に関わる二酸化炭素排出量は310（千t-C）で、排出量原単位は13.7（kg-C/t）となった。最も排出の多いプロセスとしては合材プラントにおける加熱混合工程であり、全体の60%を占める。再生合材にはアスファルト塊からの旧アスファルト分が含まれていることから、新規混合物を製造する

ときと比べてアスファルト使用量が減少する（新規アスファルトは重量比1～2％程度含まれることから4％程度減少することになる）。これにより、全体に占めるアスファルト製造プロセスの二酸化炭素排出割合が66％から32％へと新規混合物に比べて大幅に少なくなっている。すなわち両者に共通していえることは二酸化炭素排出のほとんどはアスファルト生産と合材生産工程によるものであり、再生による二酸化炭素排出量削減効果は再生によるアスファルト使用量の減少に起因する。

図4よりアスファルト塊からの再生路盤材生産は、廃材輸送－中間処理－混合の各プロセスを考慮した結果2.36（kg-C/t）、コンクリート塊からの再生は1.91（kg-C/t）となった。新規製造路盤材は、0.97（kg-C/t）となり、再生材の方が新規製造材よりも多くの二酸化炭素排出があるという結果となった。この原因として、ひとつには廃材輸送工程が挙げられる。新規で碎石を生産する場合、生産工場は採石場に隣接しているため輸送の必要がないが、再生路盤材を用いる場合は発生材を再生工場まで運搬する必要がある。この廃材輸送工程でアスファルト塊で40％、コンクリート塊で50％の二酸化炭素排出量を占めている。また、単純な新規製造プロセスに対して再生工程では異物の混入した舗装発生材から再生可能な部分だけを取り出すなど品質管理に様々な手間がかかる事も原因のひとつと考えられる。また、その他に分析データによる誤差としては、新規材の製造に関しては95年の実データを用いて算出した二酸化炭素排出量であるのに対して、再生材では積算の概念にもとづいてその平均的数値を用いて算出した見積データのため、実データとはいくらかの誤差があることが考えられる。今回の試算結果より、二酸化炭素排出量という観点からみると再生路盤材は必ずしも環境面で優位であるとは言えないが、資源の有効利用という点を考慮すると再生によって処女資源の採掘による土壌浸食およびそれにかかるエネルギー消費量等が削減されるなどの効果が見込めるため有効な手段と言える。再生時におけるコスト・環境負荷低減策としては、現状では処理工程においてできるだけ有効に再資源化を行うために、発生材を現場で十分分別するという対策が取られているに過ぎない。しかし将来的には回収・再生プロセスの整備・効率化や再生技術の向上、再生資源の品質に応じた施工管理基準の整備等により資源の有効利用だけでなく環境に配慮した再生システムを開発する必要がある。

5、舗装別二酸化炭素排出量と建設コスト

5.1 モデルの概要

設計に用いる舗装版厚は、供用開始5年後の一日一方向あたりの大型車交通量の推定値からそれぞれの区分ごとに設定された標準値を用いて決定される¹³⁾。また路盤厚は路床の設計支持力係数、あるいは設計CBRをもとに行われる。本研究ではCBR=3ないし4で路盤材に粒状材料を用いた場合の標準的な道路構造モデルケースについて検討する。モデルの概要を表2に示す。設計舗装盤厚がコンクリート舗装がアスファルト舗装よりも大きな値となり路盤厚は逆に小さい値となっているのは、アスファルト舗装が舗装構造全体で交通荷重を分散して支えているのに対してコンクリート舗装ではそのほとんどを舗装盤だけで支えているとの概念によって設計されているためである。

表2 各舗装の施工版厚（単位：cm）

	アスファルト舗装			コンクリート舗装		
	B交通	C交通	D交通	B交通	C交通	D交通
舗装版	5	10	15	25	28	30
上層路盤	20	20	20	15	15	15
下層路盤	25	30	30	20	20	25

注）B交通：大型車交通量 250～1,000台/日・一方向
C交通：同 1,000～3,000
D交通：同 3,000以上

5.2 二酸化炭素排出量と工事費との関係

3章で求めた舗装材料別二酸化炭素排出量原単位をモデルケースに適用して二酸化炭素排出量を試算した⁵⁾。ただし各舗装材料の現場への輸送は考慮しない。また再生路盤材はコンクリート塊からとアスファルト塊からの再生が考えられるが、両者の再生碎石への再資源化量はほぼ等しいためここでは混合比1：1として排出量原単位としては平均値2.16kg-C/tを用いた。再生粒度調整碎石は販売が少数の地域に限られているためここでは考慮していない。工事費については、直接工事費を考慮する。直接工事費とは工事目的物を作るために直接必要とされる費用で、材料費、労務費および直接経費に区分され積算される。価格には地域差があるがここでは97年12月現在の京都・大阪両市における価格を用いた。計算結果を図5～7に示す。なお比較を簡単にするため数

値は100m²の単位面積についての平均値である。

分析の結果からアスファルト舗装における再生材の投入に着目すると、二酸化炭素排出量削減効果はD交通での削減率が42%、順にC交通36%、B交通25%と重交通であるほど再生材の投入に大きな効果がみられる。材料別でみると先述のように再生アスファルト合材の削減率が新規材と比較して平均55%と大きく、路盤材は再生することにより排出量は微増加するので、表層を厚く施工する重交通ほど再生効果が大きくなっている。また工事費の積算については再生アスファルト混合物の販売価格が新規混合物と大きな差がないため削減効果は再生路盤材を投入した場合のみとなった。これらの結果より再生効果は一様に12%程度となっているが、軽交通の方が効果が大きく二酸化炭素排出とは逆の傾向を示している。

施工単価あたりの二酸化炭素排出量をみると新規舗装、リサイクル舗装ともに重交通になるほど段階的に大きくなっている。つまり重交通は建設コストがかかるため最終的な二酸化炭素排出量は多くなっているが、リサイクル材を使用することによる削減効果自体は大きい。

以上のことから、アスファルト舗装に再生材を投入することによりコスト面における低減効果は交通量に関わらず12%程度見込むことができ、二酸化炭素排出削減効果は特に重交通道路における再生材の投入が有効であることがわかる。

再生舗装の現状としては、平成4年度の「プラント再生舗装技術指針」改訂により再生混合物のD交通表層への適用が可能となった。しかし、日本道路協会が平成7年1月に道路管理者および施工業者を対象にアンケート調査を行ったところ、D交通への適用実績があると回答したのは道路管理者から3件（5%）、施工業者から13件（33%）にとどまっており重交通での再生は実際にはあまり進んでいない¹⁴⁾。この理由としては品質的に困難であるとの回答が最も多く、発生材の品質が一定でないことから再生材の品質が設計通りにならない場合があり、このような背景が重交通で適用可能後も再生が進まない要因の一つとなっているものと思われる。

一方、コンクリート舗装については発生材のコンクリート骨材への再生が品質的に困難であることから、再生材の投入は路盤材のみで可能とされている。しかし再生路盤材では廃材輸送の必要や中間処理工程の複雑さから二酸化炭素排出量は新規材と比較して増加するため全体の排出量は微増している。また、コストは再生材を用いることで5~6%の低減効果がある。コンクリート舗装では交通量ごとに舗装構造に大きな差がないためこれらの傾向も同様である。よってコンクリート舗装での再生効果はアスファルト舗装と比較して高くないこ

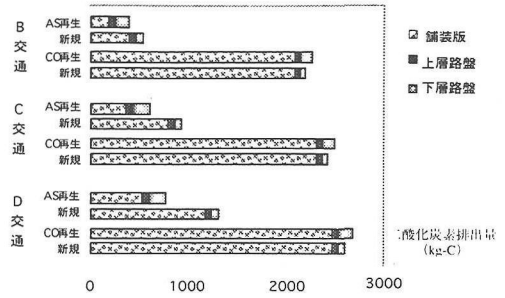


図5 100m²施工あたりの二酸化炭素排出量 注) AS: アスファルト舗装 CO: コンクリート舗装

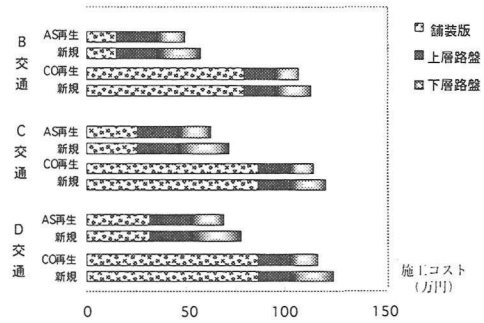


図6 100m²施工あたりの建設コスト

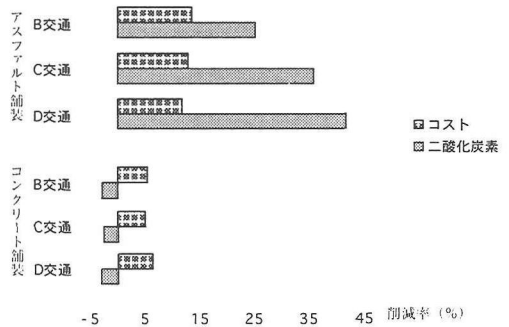


図7 二酸化炭素およびコストのリサイクルによる低減効果

となり、二酸化炭素排出量については再生材を使用することで逆に増加している。

アスファルト舗装とコンクリート舗装において同一交通量のモデルで比較してみると、新規舗装の二酸化炭素排出量の場合、コンクリート舗装はアスファルト舗装と比較してD交通で2.0倍、C交通2.6倍、B交通4.2倍となっており、二酸化炭素排出量は軽交通になるほど増加割合は大きくなる。同様に建設コストは1.6倍、1.7倍、2.0倍となり同様の傾向を示す。このことから、軽交通でコンクリート舗装を用いることは二酸化炭素排出・建設コスト両面から考えて優位ではなく、特にB交通以下ではアスファルト舗装を用いた方が圧倒的に優位であるとの判断ができる。重交通（D交通）におけるコンクリート舗装の適用は施工以降の維持・修繕頻度を考慮すると優位になることが考えられる。

6、まとめ

本研究では、代表的なインフラ施設である舗装道路の建設に用いる材料別に二酸化炭素排出量を算出しリサイクル効果を明らかにするとともに、それらを施工に適用した場合の各舗装別二酸化炭素排出量の比較と建設コストとの関係について考察を行った。得られた知見を以下にまとめる。

①再生アスファルト混合物は新規材と比較して56%の二酸化炭素排出削減効果があり、これはアスファルト使用量の低減に起因する部分が大い。②再生路盤材製造は発生材輸送の必要や中間処理に手間がかかるなどの理由から二酸化炭素排出量は新規材に比べて増加するため資源の有効利用としては推奨できるが、二酸化炭素排出という側面からは必ずしも環境面で優位であるとは言えない。③アスファルト舗装において再生による効果は重交通になるほど大きい。品質的な問題から重交通に実際適用されている再生混合物の割合は小さいと考えられる。今後リサイクルを推進するためにも、再生段階において十分な品質を保つことが課題である。④コンクリート舗装におけるリサイクル効果は二酸化炭素排出、コストの両面ともに少ない。⑤アスファルト舗装は、コンクリート舗装と比較して特に軽交通に用いると有効である。コンクリート舗装は重交通に用いる場合、建設時点での二酸化炭素排出量、コストともにアスファルト舗装より大きい。維持・修繕の手間等が少なくことからライフタイムでみると優位となる可能性がある。

道路事業において新設舗装費は平成5年以降ゆるやかに減少しているものの、平成2年度では舗装工事全体の約50%（4,400億円）を占めており、舗装修繕費とほぼ同額である。今後新設舗装費は短期的には横這いもしくは微増減を繰り返しながら（4500～5500億円）長期的に減少に向かい、同時に維持・修繕事業費が増加することが予想される。その背景としては①舗装の社会ストックの増大②道路整備事業の一段落③景気の低迷④道路整備の基本的方向の変化（量から質へ）などが考えられる。このような背景をふまえた上で、今後は材料の製造、道路の施工に加えて維持・修繕および解体等までを考慮したい。道路のライフタイムにわたる環境負荷とコストに関する分析を行い、最適舗装構造および最適修繕期間等を明らかにしていくことが課題である。

（参考文献）

- 1) 中野加都子、三浦浩之、和田安彦：廃アスファルトコンクリートの再資源化による環境インパクト低減化の評価、土木学会論文集 No.559/Ⅶ-2 pp.81-89,1997.2
- 2) 岩渕省、松本亨、井村秀文：再生路盤材のライフサイクルアセスメント、環境システム研究Vol.24 pp.430-434,1996.10
- 3) 加藤博和、林良嗣、登秀樹：道路構造代替案の地球環境負荷に関するライフサイクルの評価手法、環境システム研究Vol.24 pp.282-293,1996.10
- 4) 二酸化炭素排出量調査報告書、環境庁（1992）
- 5) 財団法人建設物価調査会：建設物価 1997.12
- 6) 財団法人日本アスファルト協会：アスファルト合材統計年報 平成7年度
- 7) 小谷昇、井田俊行、森田幸義共著：アスファルト混合物の知識
- 8) 財団法人日本アスファルト協会調査委員会：アスファルトの需給動向について、アスファルトVol.37 No.183（1995年）
- 9) 財団法人通商産業調査会：窯業・建材統計年報 平成7年
- 10) 財団法人通商産業調査会：鉄鋼統計年報 平成7年
- 11) 財団法人通商産業調査会：砕石統計年報 平成7年
- 12) 財団法人建設物価調査会：建設副産物の再生・処理の積算
- 13) 社団法人日本道路協会：アスファルト舗装要綱
- 14) 中村俊行、久保和幸、木村慎：プラント再生舗装の現状と課題について、アスファルトVol.38 No.184（1995年）