

建設廃棄物に着目した 道路のマテリアルバランス

原卓也¹・吉田好邦²・松橋隆治³

¹東京大学大学院 新領域創成科学研究科環境学専攻 博士課程 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

²工博 東京大学大学院 助手 工学系研究科地球システム工学専攻 (同上)

³工博 東京大学大学院 助教授 新領域創成科学研究科環境学専攻 (同上)

マテリアルフロー分析を道路に適用し、道路工事の環境負荷分析とわが国全体の道路のマテリアルフロー分析をおこなった。さらにこの2つの分析を融合して、環境負荷の異なる複数の道路修繕工事の施工割合によってわが国全体の道路のマテリアルフローが決定されるモデルを作成し、両者の関係を分析した。とくに建設廃棄物のマテリアルバランスに着目して分析をおこなった結果、道路は建設廃棄物の受け入れ先としては一時的な役割しか果たさず、道路からの建設廃棄物排出量の方が多くなること、建設廃棄物排出量の抑制には小規模な修繕工事を多数回施工の方が効果的であることを定量的に明らかにした。

Key Words : *material flow analysis, material balance, construction waste, recycling, asphalt concrete, crushed stone*

1. 緒論

わが国において建設産業は最大の資源消費産業であり、廃棄物排出量が最も多い産業の1つである¹⁾。なかでも道路の建設・維持修繕に伴って投入される資材量は年間約3億tと膨大である²⁾。排出される副産物量については確固たる統計データは存在しないが、相当な量であることは容易に推測される。道路のような大規模なインフラストラクチャーについて、わが国全体といったマクロな視点からその環境負荷を分析する方法としては、マテリアルフロー分析 (Material Flow Analysis, MFA) が有効である。

マテリアルフロー分析は、「ある着目した系に投入される資源やエネルギーと、系から算出される製品、副産物、廃棄物、汚染物質などについて、その総量や特定の物質の量、これらの収支バランスを、体系的・定量的に把握する手法」である³⁾。マテリアルフロー分析が対象とする系は、都市インフラストラクチャーに限らず、さまざまな製品の製造プロセスから一国全体のマテリアルフロー、さらには国際間の物質収支分析まで、非常に幅広いものとなっている。これらの研究の蓄積によって、さまざまな人間活動に伴う資源消費と環境負

荷が定量的に把握できるようになっている。

一般に、人間の活動が環境にどれだけの影響を与えているのかを定量的に把握することが環境問題に対する取り組みの第一歩である。マテリアルフロー分析による研究は、その多くがこの段階にとどまっているのが現状である。この次のステップとして、着目した系がそれだけのマテリアルフローを発生させるメカニズムの解明や環境負荷低減につながる対策の開発、およびその対策による低減効果の評価といった研究につなげる必要があると考えられる。

わが国の道路については、天野・牧田によって、複数の維持修繕工事のインベントリ分析と維持修繕パターン別のライフサイクルにおける環境負荷の評価がなされた例がある⁴⁾。この研究によれば、軽微な補修を繰り返す維持修繕のケースが大規模な修繕工事をおこなうケースに比べ環境負荷、コストにおいて有利であることが示されている。このような軽微な補修を繰り返す工法が普及することで、わが国全体においてどれだけの環境負荷低減がもたらされるか評価するためには、まずわが国の道路に対してどれだけの工事が施工されているか定量的に把握する必要がある。

一方、道路の路盤材として、コンクリート塊や

アスファルトコンクリート塊などの建設廃棄物の再生材が大量に利用されている。今後このような建設廃棄物の発生量が急増することが予測されており⁵⁾、将来においても建設廃棄物を路盤材として利用するリサイクルの方法が建設廃棄物の最終処分量削減に有効かどうか評価する必要がある。

以上の背景のもと、本研究では、まず道路工事の環境負荷分析とわが国全体の道路のマテリアルフロー分析をおこなう。次に、2つの分析を融合して、環境負荷の異なる複数の道路修繕工事の施工割合によってわが国全体の道路のマテリアルフローが決定されるモデルを作成し、両者の関係を分析する。さらに、このモデルを用いて、将来の道路における建設廃棄物のマテリアルバランスを推計し、路盤材としての建設廃棄物のリサイクルの有効性を評価する。

2. 方法

(1) 分析の概要

本研究では、まず道路の建設工事と修繕工事によるマテリアルフローと環境負荷を積み上げ法により算出する（道路工事の環境負荷分析）。この分析の結果をもとに、道路のライフサイクルにおけるマテリアルバランスを算出する（ライフサイクル評価）。次に、道路工事の環境負荷分析から得られた結果と道路に関わる統計データをもとに、わが国全体の道路におけるマテリアルストックとマテリアルフローを表現するモデルを構築する。そのモデルに基づいて1995年度のマテリアルフローを推定する（現状のマテリアルフローの推定）。さらにいくつかの想定した将来シナリオのもとで、道路における建設廃棄物のマテリアルバランスを推計する（将来のマテリアルバランスの推計）。

以下に本研究が対象とする道路、修繕工事、建設資材、建設副産物について説明する。

a) 舗装道路と道路修繕工事

本研究では、舗装道路としてアスファルト舗装と簡易舗装の2種類を対象とする。どちらの道路ともアスファルト混合物からなるアスファルト層とその下の砕石からなる路盤層という舗装構成となっている。

各々の舗装道路の維持修繕工法として、大規模な修繕工事とより軽微な修繕工事をそれぞれ代表する工法として、打ち換え工と切削オーバーレイという2種類の工法を考慮する。打ち換え工はアスファルト層と路盤層を全量掘削して新たな資材と置き換える工法であり、切削オーバーレイはアスファルト層のみを全量掘削して新たな資材と置き換える工法として扱う。

b) 建設資材

本研究で想定する道路のマテリアルフローは図-1のように表される。道路工事に使用される資材として、アスファルト混合物と路盤用砕石の2種類を対象とする。各々新材と再生材が存在する。再生材は廃棄物（アスファルトコンクリート塊、コンクリート塊、スラグなど）と新材との混合物である。マテリアルバランスの定量評価をおこなう場合には再生材製造プロセスデータ⁶⁾⁷⁾に基づき、再生アスファルト混合物中の廃棄物の混合比を30%、路盤用再生砕石中の廃棄物の混合比を100%とおいて計算をおこなっている。

c) 建設副産物

修繕工事によって道路から発生する副産物は、再利用されない場合、建設発生土もしくは建設廃棄物に分類され、それぞれの基準に従って処理される。

アスファルトコンクリート塊（もとはアスファルト混合物だったもの）の再利用率は1995年で

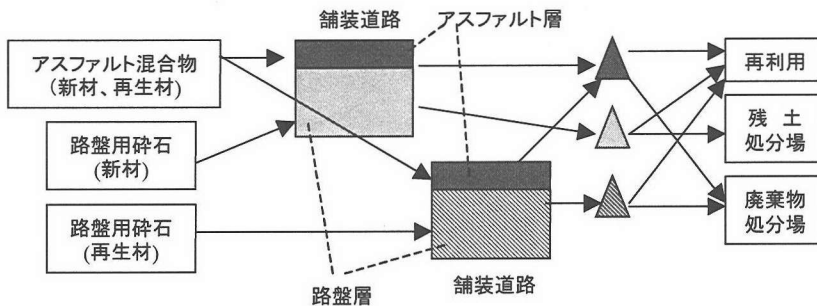


図-1 本研究で想定する道路のマテリアルフロー

81%⁸⁾、2000年で98%⁹⁾とほぼ全量が再利用されている。それに対し、路盤発生材（もとは路盤用碎石だったもの）の再利用率は少なく、多くが利用未指定として礫混じり土として排出されているということが黒田・渡辺・山田¹⁰⁾により指摘されている。

この再利用されない路盤発生材が建設発生土なのか建設廃棄物なのかについて統一的な基準は存在しない。本研究では、もともと新材による路盤用碎石だったものは礫質土として建設発生土に分類できるが、もともと再生材による路盤用碎石だったものは建設廃棄物に分類されるべきものであるという立場をとる。なぜなら、建設廃棄物の最終処分量を削減するために路盤材としての再利用が進められている一方で、一度道路を通過した再生材は建設発生土として残土処分場で処分できるというのはつじつまが合わないと考えるからである。わざわざ道路で再利用してから建設発生土として処分するくらいなら、はじめからコンクリート塊なども残土処分場で処分できるようにしても変わらないと考えることもできてしまうが、このような考え方は廃棄物を資源として循環させ資源消費量と廃棄物排出量をともに削減していくという循環型社会を目指す方向性には沿わないものである。廃棄物問題対策を廃棄物処分場の延命という視点だけから捉えるのではなく、低環境負荷の循環型社会への構築につながるものでなければならない。そのためにも廃棄物のマテリアルフローを把握する必要がある。以上の考えに基づき、本研究では、アスファルトコンクリート塊と再生碎石からなる路盤発生材を道路から排出される建設廃棄物としてカウントする。

(2) 道路工事の環境負荷分析とマテリアルバランスのライフサイクル評価

道路工事に伴う環境負荷を評価した天野・牧田⁴⁾の方法を踏襲して、初期建設、維持修繕工事による建設資材使用量とCO₂排出量を算出する。後述する方法により設定した道路の舗装構成に基づき、初期建設に要する建設資材量を算出する。CO₂排出量は、工事で使用される機械燃料由来のCO₂、建設資材製造に由来するCO₂、建設資材・副産物運搬に由来するCO₂を考慮する。

道路工事の環境負荷分析の結果をもとに、道路の修繕スケジュール別・使用建設資材別の各ケースについて、ライフサイクルにおけるマテリアルバランスを算出する。

(3) わが国全体の道路のマテリアルフローモデル

a) ストックとストック増加

道路統計年報¹¹⁾の分類に基づき、わが国の道路として高速・国・都道府県道と市町村道の2種類の道路種（添字： i ）を考慮する。さらに、アスファルト舗装と簡易舗装の2種類の舗装種（添字： j ）を考慮する。ここで、道路種別・舗装種別の道路延長を $L_{i,j}$ 、道路種別の幅員を $wide_i$ 、舗装種別の道路面積あたりの資材固定原単位を $U_{j,k}$ とすると、 t 年度におけるわが国の道路全体における資材 k のストック量 $S_{t,k}$ は

$$S_{t,k} = \sum_{i,j} L_{i,j} \cdot wide_i \cdot U_{j,k} \quad (1)$$

で与えられる。資材種 k は、アスファルト層に固定されたアスファルト混合物（添字： as ）と路盤層に固定された碎石（添字： rc ）の2種類である。実際の道路は、幅員、舗装構成が多種多様であるが、このモデルでは幅員と舗装構成が異なる4種類の道路しか存在しないという単純化をおこなっている。

1年間に新たに道路が建設され道路延長が $\Delta L_{t,i,j}$ だけ変化することによって増加する資材 k のストック増加量 $\Delta S_{t,k}$ は

$$\Delta S_{t,k} = \sum_{i,j} \Delta L_{t,i,j} \cdot wide_i \cdot U_{j,k} \quad (2)$$

で与えられる。

b) ストックの更新

1年間に修繕工事が施工される面積割合を m_t とし、修繕工事のうち切削オーバーレイが占める割合を c_t とすると、修繕工事によって更新される資材量 $D_{t,k}$ はそれぞれ次式のように表される。

$$D_{t,as} = m_t S_{t,as} \quad (3)$$

$$D_{t,rc} = (1 - c_t) m_t S_{t,rc} \quad (4)$$

道路において修繕工事が施工される頻度は、交通量等による舗装への負荷により異なると考えられるが、ここでの m_t は道路全体の平均的な修繕工事面積割合に相当するものである。またこのモデルでは、打ち換え工は道路のアスファルト層と路盤層をすべて入れ替える工法であり、切削オーバ

ーレイはアスファルト層のみを入れ替える工法であると想定している。これにより、アスファルト層はどちらの工事でも入れ替えられるため、修繕工事面積割合 m_i はアスファルト混合物の更新率に等しいものになる。路盤用砕石の更新率は打ち換え工の施工率 $(1-c_i)$ m_i に等しいものになる。

ストックの更新によって発生した副産物は、再び道路用の資材としてリサイクルされるか、道路外部に排出されるかのいずれかである。このことから次式が成立する。

$$D_{i,k} = R_{i,k} + W_{i,k} \quad (5)$$

ただし、 $R_{i,k}$ は再び道路用の資材としてリサイクルされる量であり、 $W_{i,k}$ は道路外部に排出される量である。

$R_{i,k}$ は次式のように再利用先ごとのリサイクル量に分割される。

$$R_{i,as} = R_{i,as,1} + R_{i,as,2} + R_{i,as,3} \quad (6)$$

$$R_{i,rc} = 0 \quad (7)$$

ただし $R_{i,as,1}$ はアスファルト層の更新によって発生したアスファルトコンクリート塊のうち道路工事現場内で路盤用砕石としてリサイクルされるものである。道路工事現場内外でのリサイクル方法として、アスファルトコンクリート塊は、再生プラントで再生アスファルト混合物にリサイクルされ道路に使用されるもの ($R_{i,as,2}$)、再生プラントで砕石にリサイクルされ道路で使用されるもの ($R_{i,as,3}$) がある。 $R_{i,as,3}$ は統計データに表れる量であるが、 $R_{i,as,1}$ は統計データには表れず、マテリアルバランスから推定される量であるため、このモデルでは別々に扱っている。

路盤発生材のうち、現状でどれくらいの量がリサイクルされているかは不明であるが、路盤発生材の多くが礫混じり土として排出され、再利用される量は非常に少ないという黒田・渡辺・山田¹⁰⁾による指摘がある。そこで、路盤発生材が再び路盤用砕石にリサイクルされる量 ($R_{i,rc}$) は無視できるとした。そのため路盤発生材のリサイクル量はゼロとおき、路盤発生材は全量が道路外部へ排出されるものとしている。本研究では考慮していないが、路盤発生材のリサイクルによる新材使用量

の抑制の可能性と道路外部からの建設廃棄物受け入れ量への影響を検討することは重要である。

c) 資材の投入と道路内部のリサイクル

新規の道路建設と修繕工事によるストックの更新によって道路における資材需要が発生する。この資材需要に対して建設資材が投入される。建設資材の投入量 $I_{i,k}$ は

$$I_{i,k} = D_{i,k} + \Delta S_{i,k} \quad (8)$$

で与えられる。

投入される建設資材は、道路内部から発生した副産物からなる再生材 $I_{i,k,1}$ 、道路外部からの建設廃棄物からなる再生材 $I_{i,k,2}$ 、道路外部からの新材 $I_{i,k,3}$ の3種類に分けられる。

$$I_{i,k} = I_{i,k,1} + I_{i,k,2} + I_{i,k,3} \quad (9)$$

道路内部から発生した副産物からなる再生材 $I_{i,k,1}$ と道路の更新によって発生した副産物のリサイクル量 $R_{i,k}$ の関係は次式のとおりである。

$$I_{i,as,1} = \frac{R_{i,as,2}}{0.3} \quad (10)$$

$$I_{i,rc,1} = R_{i,as,1} + R_{i,as,3} \quad (11)$$

(4) 現状のマテリアルフローの推定

1995年度の各種統計データとマテリアルフローモデルから1995年度のわが国全体の道路のマテリアルフローを推定する。ストック量算出にあたって必要な道路の舗装構成は以下のように設定する。

道路の舗装構成は、設計段階において路床の設計 CBR と推定交通量 (L, A, B, C, D の5区分) に基づいて決定される。このモデルにおいては、日本全体の道路の平均的交通量が B 交通に相当するものである¹²⁾ことから、アスファルト舗装道路については設計 CBR=3 で推定交通量が B 交通の道路の舗装構成とした¹³⁾。簡易舗装については設計 CBR = 3 の舗装構成とした¹⁴⁾。設定した舗装構成を表-1に示す。

マテリアルフローモデルにより統計データが存在しない部分のマテリアルフローが推定できるとともに、式 (3)、式 (4) を変形することで、道

表-1 道路の舗装構成

アスファルト舗装道路		
	使用材料	厚さ(cm)
表層	加熱アスファルト混合物	5
基層	加熱アスファルト混合物	5
上層路盤	粒度調整碎石	25
下層路盤	クラッシュラン	25
合計		60

簡易舗装道路		
	使用材料	厚さ(cm)
表層	加熱アスファルト混合物	3
路盤層	粒度調整碎石	25
合計		28

路修繕工事が施工される面積割合 m_t とそのうち切削オーバーレイが占める割合 c_t が次式により推定できる。

$$m_t = \frac{I_{t,as} - \Delta S_{t,as}}{S_{t,as}} \quad (12)$$

$$1 - c_t = \frac{I_{t,rc} - \Delta S_{t,rc}}{m_t S_{t,rc}} \quad (13)$$

現状のマテリアルフロー推定において、独立な変数（データが得られる変数）は、道路延長 $L_{i,j}$ 、道路延長増加量 $\Delta L_{i,j}$ 、道路幅員 $wide_j$ 、資材固定原単位 $U_{j,k}$ 、アスファルト混合物投入量 $I_{t,as,1}$ 、 $I_{t,as,2}$ 、 $I_{t,as,3}$ 、路盤用碎石投入量 $I_{t,rc,2}$ 、 $I_{t,rc,3}$ 、アスファルトコンクリート塊排出量 $W_{t,as}$ 、アスファルト混合物ストック更新量 $D_{t,as}$ である。

(5) 将来のマテリアルバランスの推計

道路外部から道路へ投入される資材として、天然資材量を $I_{t,vr}$ 、廃棄物量を $I_{t,re}$ とするとそれぞれ

$$I_{t,vr} = 0.7(I_{t,as,1} + I_{t,as,2}) + I_{t,as,3} + I_{t,rc,3} \quad (14)$$

$$I_{t,re} = 0.3I_{t,as,2} + I_{t,rc,2} \quad (15)$$

と表される。

道路外部から道路へ投入される廃棄物量 $I_{t,re}$ と道路から道路外部へ排出される建設廃棄物量 $W_{t,as} + W_{t,rcs}$ の大小を比較することで、道路がネッ

トで建設廃棄物の受け入れ先となっているかどうか評価できる。

道路延長の増加量、道路修繕工事に占める切削オーバーレイの比率 c_t の変化を将来のシナリオとして与え、その時のマテリアルバランスを推計する。その際に考慮すべきこととして、修繕工事が施工される面積割合 m_t は切削オーバーレイの比率 c_t の値によって変化するということである。ライフサイクル評価の結果の節で後述するように、修繕工事においては、打ち換え工を12年ごとの施工と切削オーバーレイを8年ごとの施工が、道路の供用性を維持する修繕スケジュールとしてほぼ等価である¹⁵⁾。これは、1年間のある一定面積の道路に対しての修繕工事の面積割合としては、打ち換え工の場合1/12となるのに対し、切削オーバーレイでは1/8となるということである。これに基づき、打ち換え工の施工面積1と等価な切削オーバーレイの施工面積を1.5とみなし、切削オーバーレイが全く行われない場合 ($c_t = 0$) の道路修繕工事の面積割合を m_0 とおき、 m_t と c_t が次式のような関係にあると想定する。

$$m_t = m_0 + 0.5 \times c_t \times m_0 \quad (16)$$

マテリアルフローの推計方法は(3)節で示したモデルのとおりであるが、補足点を以下に示す。

まず式(3)、式(4)より、 t 年度のストックから、修繕工事(ストックの更新)によって発生する副産物量を求める。ただし、路盤用碎石のストックは、新材と再生材のストックに分かれ、それぞれのストックからの発生量は、道路からの建設発生土発生量と建設廃棄物発生量とに分かれるため区別する必要がある。そこで、それぞれのストックの更新量はストック量に比例すると仮定して、次式で表されるものとする。

$$D_{t,vrrc} = (1 - c_t)m_t S_{t,vrrc} \quad (17)$$

$$D_{t,rrcc} = (1 - c_t)m_t S_{t,rrcc} \quad (18)$$

このように路盤用碎石を新材と再生材に分けた場合、式(5)、式(7)についてはそれぞれ同様に成立し、式(9)は次のように表される。

$$I_{t,vrrc} = I_{t,rc,3} \quad (19)$$

$$I_{t,rrc} = I_{t,rc,1} + I_{t,rc,2} \quad (20)$$

$t+1$ 年度の路盤用碎石ストックは次式で定まる。

$$S_{t+1,vrrc} = S_{t,vrrc} + I_{t,vrrc} - D_{t,vrrc} \quad (21)$$

$$S_{t+1,rrc} = S_{t,rrc} + I_{t,rrc} - D_{t,rrc} \quad (22)$$

将来の材料フローの推計において、独立な変数（想定するシナリオに基づいてデータが与えられる変数）は、道路延長 $L_{t,i,j}$ 、道路延長増加量 $\Delta L_{t,i,j}$ 、道路幅員 $wide_i$ 、資材固定原単位 $U_{j,k}$ 、道路修繕工事が施工される面積割合 m_t 、切削オーバーレイが占める割合 c_t 、アスファルトコンクリート塊のリサイクル率 $R_{t,as}/D_{t,as}$ 、 $R_{t,as,1}/R_{t,as}$ 、 $R_{t,as,2}/R_{t,as}$ 、 $R_{t,as,3}/R_{t,as}$ 、である。ただしリサイクル率に関しては材料バランスの制約を満たさない場合には変化する（例：リサイクル量が資材需要量を超過する場合には、資材需要量に合わせてリサイクル率を定める）。

以上説明したわが国全体の道路の材料フローモデルを図-2に示す。

3. 道路工事の環境負荷分析と材料バランスのライフサイクル評価

(1) 道路工事の環境負荷分析

表-1に示される舗装構成の道路について、建設工事と修繕工事に伴って投入される資材量とCO₂排出量を土木工事の積算手法を用いて計算を行った^{16),17),18)}。CO₂排出量のうち、工事で使用される機械燃料由来のCO₂と建設資材・副産物運搬に由来するCO₂は積算資料をもとに算出し、建設資材製造に由来するCO₂は統計資料等^{2),19),20),21)}をもとに算出した。表-2に道路100m²あたりの結果を示す。

初期建設工事と打ち換え工を比較すると、投入資材量に差はないが打ち換え工の方は投入資材量と同量の副産物が発生するため、運搬によるCO₂排出量が大きな割合を占めるという結果になった。打ち換え工と切削オーバーレイを比較すると、切削オーバーレイではアスファルト混合物の投入がない分、素材由来のCO₂についてアスファルト舗装で44%減少、簡易舗装で42%減少、運搬由来のCO₂についてアスファルト舗装で85%減少、簡易

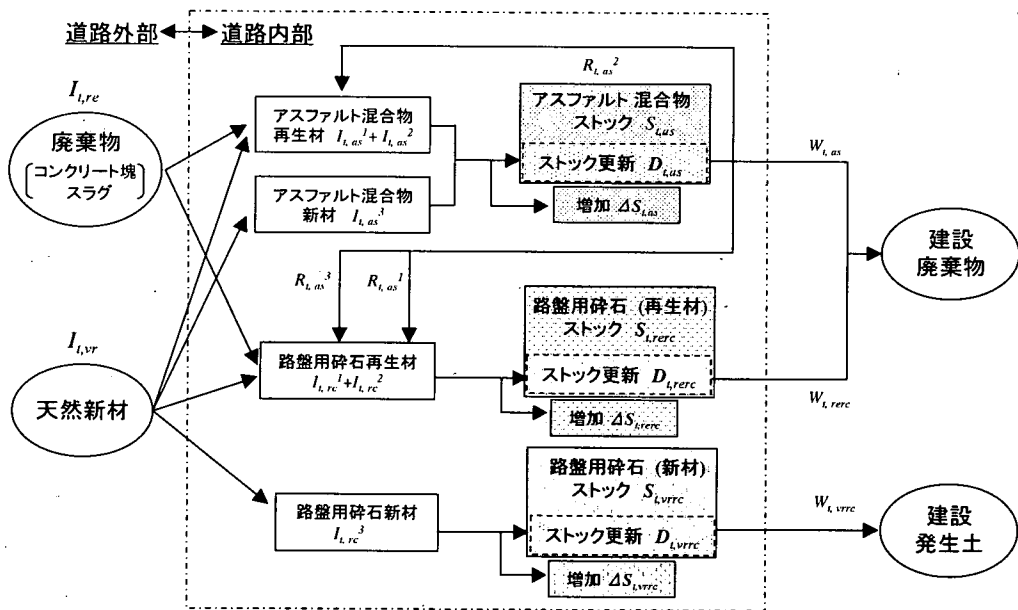


図-2 道路の材料フローモデル

舗装で 90%減少となり、CO₂ 排出量の合計では、アスファルト舗装で 80%減少、簡易舗装で 85%減少という結果になった。それに比較して、再生材を用いることによる CO₂ 排出量の削減効果は小さいという結果が得られた。

(2) マテリアルバランスのライフサイクル評価
道路工事の環境負荷分析の結果をもとに、道路のライフサイクルにおけるマテリアルバランスを算出した。ライフサイクル解析期間を 25 年間とし、アスファルト舗装道路、簡易舗装道路それぞれについて表-3 に示すライフサイクルシナリオ、表-4

表-2 道路工事 100m² あたりの投入資材量と CO₂排出量

初期建設(新材)			初期建設(再生材)		
投入資材量(t)	アスファルト舗装	簡易舗装	投入資材量(t)	アスファルト舗装	簡易舗装
アスファルト混合物	25.4	7.6	再生アスファルト混合物	17.8	5.3
			建設廃棄物	7.6	2.3
路盤用砕石	108.3	54.9	路盤用砕石(新材)	0.0	0.0
			建設廃棄物	108.3	54.9
CO ₂ 排出量(t-C)	アスファルト舗装	簡易舗装	CO ₂ 排出量(t-C)	アスファルト舗装	簡易舗装
工事	0.03	0.01	工事	0.03	0.01
運搬	0.39	0.14	運搬	0.39	0.14
素材	0.47	0.16	素材	0.46	0.17
合計	0.89	0.32	合計	0.88	0.33
修繕工事・打ち換え工(新材)			修繕工事・打ち換え工(再生材)		
投入資材量(t)	アスファルト舗装	簡易舗装	投入資材量(t)	アスファルト舗装	簡易舗装
アスファルト混合物	25.4	7.6	再生アスファルト混合物	17.8	5.3
			建設廃棄物	7.6	2.3
路盤用砕石	108.3	54.9	路盤用砕石(新材)	0.0	0.0
			建設廃棄物	108.3	54.9
CO ₂ 排出量(t-C)	アスファルト舗装	簡易舗装	CO ₂ 排出量(t-C)	アスファルト舗装	簡易舗装
工事	0.12	0.09	工事	0.12	0.09
運搬	0.74	0.37	運搬	0.74	0.37
素材	0.46	0.16	素材	0.47	0.18
合計	1.32	0.62	合計	1.33	0.64
修繕工事・切削オーバーレイ(新材)			修繕工事・切削オーバーレイ(再生材)		
投入資材量(t)	アスファルト舗装	簡易舗装	投入資材量(t)	アスファルト舗装	簡易舗装
アスファルト混合物	25.4	7.6	再生アスファルト混合物	17.8	5.3
			建設廃棄物	7.6	2.3
路盤用砕石	0.0	0.0	路盤用砕石(新材)	0	0
			建設廃棄物	0	0
CO ₂ 排出量(t-C)	アスファルト舗装	簡易舗装	CO ₂ 排出量(t-C)	アスファルト舗装	簡易舗装
工事	0.04	0.03	工事	0.04	0.03
運搬	0.10	0.03	運搬	0.10	0.03
素材	0.12	0.03	素材	0.05	0.03
合計	0.26	0.10	合計	0.19	0.09

表-3 設定した道路のライフサイクルシナリオ

道路種	シナリオ	シナリオ概要	具体的シナリオ設定	
			アスファルト舗装道路	簡易舗装道路
アスファルト舗装道路	シナリオA	大規模工事、少数回施工	打ち換え工を12年目、24年目に施工	
	シナリオB	小規模工事、多数回施工	切削オーバーレイを8年目、16年目、24年目に施工	
簡易舗装道路	シナリオC	大規模工事、少数回施工	打ち換え工を12年目、24年目に施工	
	シナリオD	小規模工事、多数回施工	切削オーバーレイを8年目、16年目、24年目に施工	

表-4 設定した道路工事の使用材料ケース

	初期建設	維持修繕
ケース1	新規材	新規材
ケース2	新規材	再生材
ケース3	再生材	再生材

表-5 道路のライフサイクルにおける建設廃棄物排出量に対する受け入れ量の比

シナリオA			シナリオB		
ケース1	ケース2	ケース3	ケース1	ケース2	ケース3
0.00	1.46	1.30	0.00	0.30	1.82
シナリオC			シナリオD		
ケース1	ケース2	ケース3	ケース1	ケース2	ケース3
0.00	1.63	1.37	0.00	0.30	2.80

に示す使用材料のケースを設定した。ライフサイクルシナリオは、道路の供用性低下が MCI (Maintenance Control Index, 維持管理係数) の予測式¹⁵⁾に従うものとして、どのケースでも MCI が 3.0~5.0 まで低下した段階で修繕工事をおこなうように設定した。どのシナリオも道路の供用性を維持するための修繕工事の施工シナリオとしてほぼ等価なものとなっている。アスファルト舗装道路、簡易舗装道路の結果を図-3、図-4 に示す。

図-3、図-4 の縦軸では道路に投入される量をマイナス、道路から排出される量をプラスで表している。建設廃棄物のマテリアルバランスをみると、修繕工事として打ち換え工を施工するシナリオ A、C においてはケース 2、3 がマイナスとなり、修繕工事として切削オーバーレイを施工するシナリオ B、D においてはケース 3 のみがマイナスとなった。

マテリアルバランスをみると、打ち換え工を施

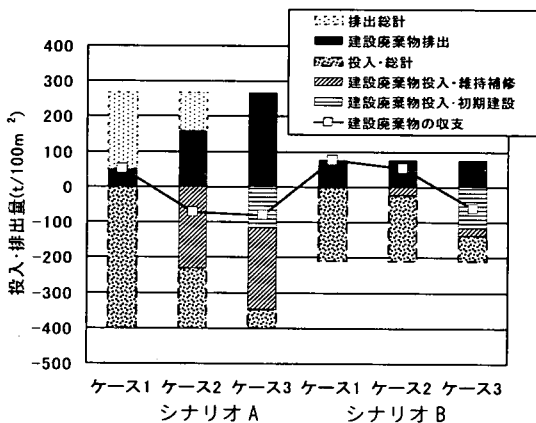


図-3 アスファルト舗装のマテリアルバランス

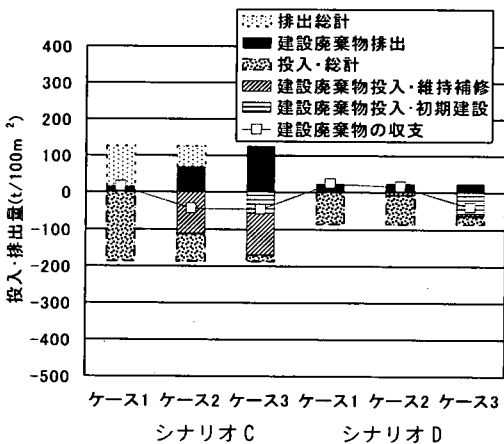


図-4 簡易舗装のマテリアルバランス

工し初期建設から再生材を用いたシナリオ A、シナリオ C のケース 3 でネットの建設廃棄物受け入れ量が最大となった。しかし、打ち換え工は資材投入量とともに副産物排出量も大量であるため、建設廃棄物受け入れ量が多いとそれだけ建設廃棄物排出量も多くなる。道路の建設廃棄物受け入れ先としてはたらしを評価することを目的としてマテリアルバランスをみる場合には、建設廃棄物の絶対量の収支より受け入れ量と排出量の比が指標として有効であると考えられる。表-5 に各シナリオ・ケースの建設廃棄物の排出量に対する受け入れ量の比を示す。この比では、切削オーバーレイを施工し初期建設から再生材を用いたケースが最も大きな値を示した。この結果から、このシナリオ・ケースにおいて道路がネットでの建設廃棄物受け入れ先として最も効果的なたらしをするといえる。

4. わが国全体の道路のマテリアルフロー分析

(1) 推定に用いたデータ

1995 年度のマテリアルフローを推定した。推定に用いたデータのうち、マテリアルフローに関わる資材投入量と副産物排出量、マテリアルストックに関わる道路延長、道路延長増加量、道路幅員は表-6 のとおりである。道路延長、道路延長増加量、道路幅員は道路統計年報に基づいたものである。ただし、アスファルト舗装道路の延長は簡易舗装道路以外の舗装済道路延長（高級舗装）の

表-6 1995 年度のマテリアルフロー推定に用いたデータ

道路延長(km)		
	アスファルト舗装	簡易舗装
高速・国・都道府県道	93,518	59,160
市町村道	122,023	512,190
道路延長増加量(km)		
	アスファルト舗装	簡易舗装
高速・国・都道府県道	1,808	-658
市町村道	1,666	7,650
道路平均幅員(m)		
高速・国・都道府県道	9.8	
市町村道	4.9	
資材投入・副産物排出量(百万t)		
	資材投入量	排出量
アスファルト混合物	57.93	27.30
路盤用砕石骨材	257.18	N.A

80%の数値を用いた（あとの20%はコンクリート舗装道路）。アスファルト混合物の投入量は、アスファルト合材統計¹⁶⁾に基づき、官公庁向けの出荷量を道路向けの出荷量とみなしてこの値を用いた（全生産量の76.6%）。路盤用碎石の投入量は、碎石統計²⁾に基づいた道路用碎石生産量，建設副産物実態調査⁸⁾に基づいた再生碎石生産量，モデルから求められる道路内部リサイクル量の3つの和とした。

(2) 推定の結果

以上の方法で推定した道路のマクロなマテリアルフローの結果を、フローベースとさらに資材投入量についての詳しい内訳、およびストックベース別に図-5、図-6、図-7に示す。

a) フローベース

道路へ投入される資材量は合計で3.15億t，そのうち82.9%が既存ストックの更新にまわっているという結果が得られた。これはすなわち、資材需要量の82.9%が修繕工事に由来するというのである。

アスファルト混合物の既存ストックの更新によって発生したアスファルトコンクリート塊のうち、4380万tは道路工事現場内でリサイクルされるという結果になった。これは統計には表れない数値であり、モデルのマテリアルバランスから導かれる数値である。道路の更新によって道路外部へ排出される副産物は2.2億tと推定された。このほとんどが路盤用碎石であった。路盤用碎石の排出量に関する統計はなく、これらは統計では建設発生土量に含まれていると考えられる。

b) 資材投入量の内訳

資材投入量のうち再生材が占める割合は、アスファルト混合物で30.2%，路盤用碎石で28.8%と推定された。これをさらに資材投入量のうち道路内外の廃棄物が占める割合にわけると、アスファルト混合物で道路外部の廃棄物が1.8%，路盤用碎石で道路外部の廃棄物が13.4%と推定された。

現状の資材を100%再生材で代替可能とすれば、1995年において道路は2億tの廃棄物受け入れポテンシャルを有していたと推定された。

c) ストックベース

アスファルト混合物の既存ストックの更新率は7.91%，路盤用碎石の既存ストックの更新率は6.36%と推定された。式(12)に示したように、このモデルではアスファルト混合物の既存ストックの更新率は道路修繕工事の面積割合(m_i)に等しくなる。修繕工事の面積割合の逆数は修繕工事

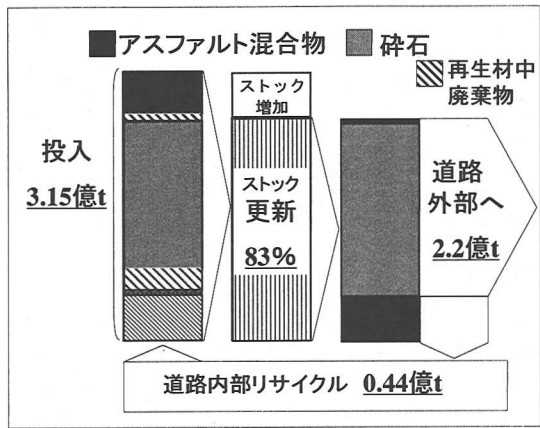


図-5 1995年度におけるわが国全体の道路のマテリアルフロー（フローベース）

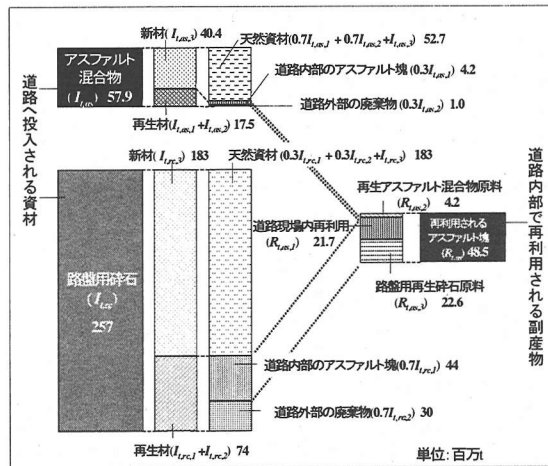


図-6 1995年度におけるわが国全体の道路のマテリアルフロー（資材投入量内訳）

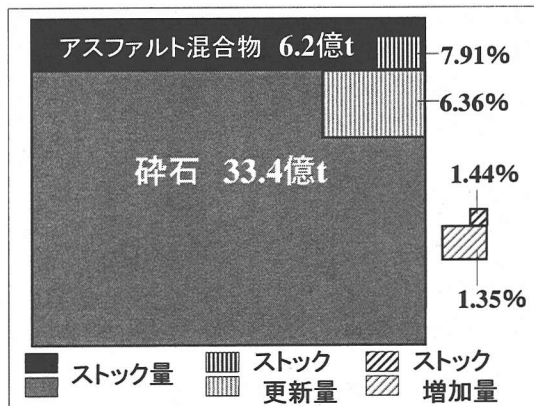


図-7 1995年度におけるわが国全体の道路のマテリアルフロー（ストックベース）

間の平均期間とみなせると考えられるが、この推定の結果からは 12.6 年という値が得られた。道路が平均して 12 年程度に 1 度修繕工事が施工されるという結果は道路の一般的ライフサイクルと大きくは矛盾しないものと考えられる。

修繕工事のうち切削オーバーレイが占める割合 (c_i) は 19.6% と低く、道路工事の大部分が打ち換え工であるという結果が得られた。

5. 将来のマテリアルバランスの推計

(1) 推計の概要

1995 年度のマテリアルフローの推定結果をもとに、1995~2030 年の期間で将来のマテリアルバランスを推計した。

マテリアルバランスのライフサイクル評価からは修繕工事の違いにより道路の建設廃棄物受け入れ量と排出量が大きく異なることが示された。現状のマテリアルフローの推定からは、道路に投入される建設資材のうち再生材の割合は小さいことが示された。そこで本章では、将来の道路修繕工事に占める切削オーバーレイの比率 c_i と道路に投入される再生材量についていくつかのケースを想定し、それらのケースのもとで将来のマテリアルバランスを推計した。

(2) 推計の前提条件

a) 将来の道路延長

道路延長の増加が式 (21) で表されるロジスティック曲線に従うと仮定して、高速・国・都道府県道と市町村道のそれぞれについて 1980-1999 年の全舗装道路延長と高級舗装道路延長の実データから回帰係数を求め、これらの式より将来の道路延長を決定した。簡易舗装道路延長は全舗装道路延長と高級舗装道路延長の差、アスファルト舗装道路延長は高級舗装道路延長の 80% の値としてそれぞれの将来の道路延長とした。求められた回帰係数の値と将来の道路延長を表-7、図-8 に示す。

$$L_{t,i,j} = \frac{a_{i,j}}{1 + b_{i,j} \exp(-c_{i,j}t)} \quad (21)$$

b) 将来推計の初期値

4 章で求めた 1995 年度のマテリアルフローの推定値を初期値とした。ただし、路盤用再生砕石のストック ($S_{i,rec}$) については 0 とした。このよう

に初期値を設定したことで、この推計は将来道路から排出される建設廃棄物量を最小限に見積もったものになっている。

(3) 推計のケース

将来の修繕工事に占める切削オーバーレイの比率 (c_i) と道路に投入される再生資材量についてそれぞれ現状維持ケースと改善ケースを想定し、計 4 つのケースで推計をおこなった。

・ケース 1—現状維持ケース

将来の切削オーバーレイの比率 (c_i) が 1995 年推定値 19.6% のまま一定値で推移。道路外部からの建設廃棄物からなる再生材 ($I_{i,k,2}$) も 1995 年推定値のまま一定値で推移。

・ケース 2—修繕工事改善ケース

将来の切削オーバーレイの比率 (c_i) が 1995 年推定値 19.6% から年 2% ずつ上昇し、80% まで達するケース (80% に達した 2026 年以降は 80% のまま一定値で推移)。道路外部からの建設廃棄物からなる再生材 ($I_{i,k,2}$) は 1995 年推定値のまま一定値で推移。

・ケース 3—再生材利用量拡大ケース

道路外部からの建設廃棄物からなる再生材 ($I_{i,k,2}$) が 1995 年推定値から 2% ずつ拡大 (ただしマテリアルバランスに關す

表-7 将来の道路延長の回帰式の係数値

	国・都道府県道		市町村道	
	舗装道路 (高級+簡易)	高級舗装	舗装道路 (高級+簡易)	高級舗装
<i>a</i>	202077	188258	184210	761387
<i>b</i>	1.424	0.322	1.022	1.201
<i>c</i>	0.042	0.098	0.100	0.134
決定係数	0.99	0.99	0.99	0.99

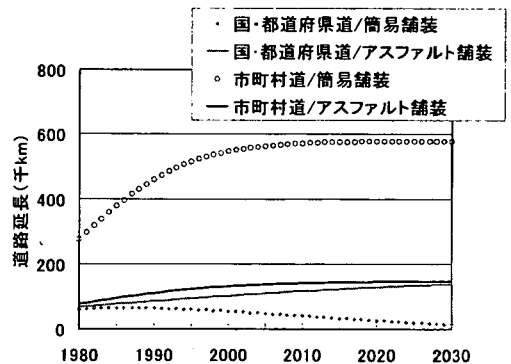


図-8 将来の道路延長想定値

る制約式に従う)。将来の切削オーバーレイの比率 (c_i) は 1995 年推定値 19.6% のまま一定値で推移。

・ケース 4—修繕工事改善・再生材利用量拡大ケース

将来の切削オーバーレイの比率 (c_i) が 1995 年推定値 19.6% から年 2% ずつ上昇し、80% まで達するケース (80% に達した 2026 年以降は 80% のまま一定値で推移)。道路外部からの建設廃棄物からなる再生材 ($I_{i,k,2}$) が 1995 年推定値から 2% ずつ拡大 (ただしマテリアルバランスに関する制約式に従う)。

(4) 推計の結果

ケース 1~4 について、道路への資材総投入量 ($I_{i,vr} + I_{i,re}$)、副産物総排出量 ($W_{i,as} + W_{i,rrc} + W_{i,vrrc}$)、道路外部からの建設廃棄物最大受け入れ可能量 ($0.3I_{i,as} + I_{i,rc} - R_{i,as}$)、道路外部からの建設廃棄物受け入れ量 ($I_{i,re}$)、道路外部へ排出される建設廃棄物量 ($W_{i,as} + W_{i,rrc}$) を推計した結果を図-9~12 に示す。なお道路外部からの建設廃棄物

最大受け入れ可能量とは、建設廃棄物からの再生材で代替可能な資材量 ($0.3I_{i,as} + I_{i,rc}$) から道路から発生した建設廃棄物によるリサイクル量 ($R_{i,as}$) を除いたもので、道路による建設廃棄物受け入れのポテンシャルを表したものである。

本研究では道路の中・長期的なマテリアルバランスに着目しているため、その結果に大きく影響しない投入と排出のタイムラグについては考慮せず、モデルでは排出量がストック量に比例するようになっている。そのため全てのケースで共通して 2000~2005 年の間で道路外部からの建設廃棄物受け入れ量 ($I_{i,re}$) を道路外部へ排出される建設廃棄物量 ($W_{i,as} + W_{i,rrc}$) が超過するという結果となっている。

ケース 1 とケース 3 では、道路外部からの建設廃棄物受け入れ量はケース 1 で一定、ケース 3 で毎年 2% ずつ増加している一方で、道路外部へ排出される建設廃棄物量はそれ以上のペースで増加するという結果が得られた。

ケース 2 とケース 4 では、2015~2020 年の間に道路外部からの建設廃棄物受け入れ量が減少に転じ、切削オーバーレイの比率 (c_i) が 80% に達し

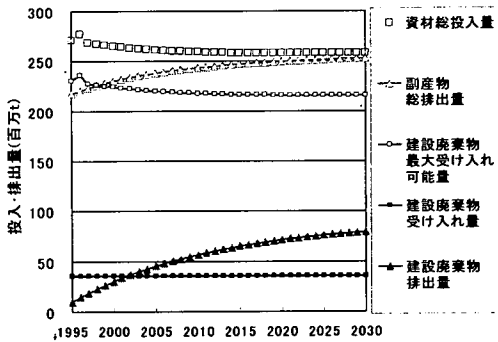


図-9 将来のマテリアルバランス (ケース 1)

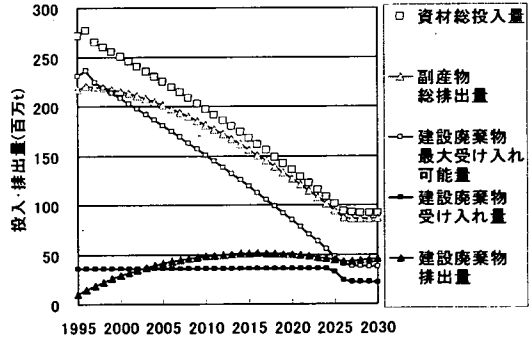


図-10 将来のマテリアルバランス (ケース 2)

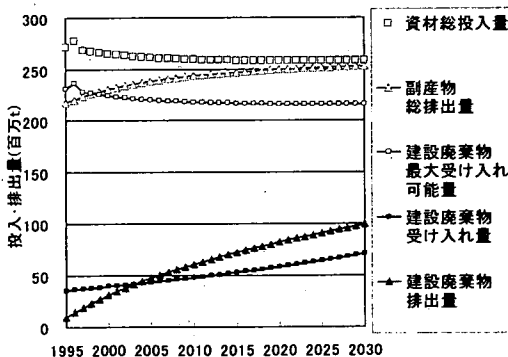


図-11 将来のマテリアルバランス (ケース 3)

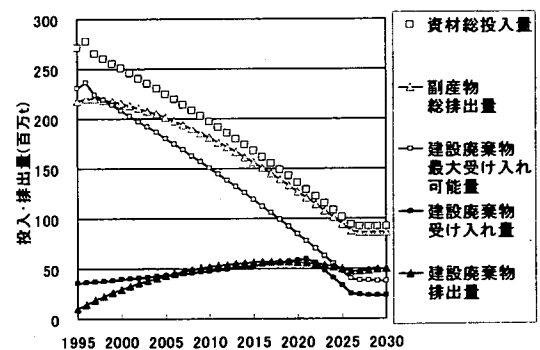


図-12 将来のマテリアルバランス (ケース 4)

た 2026 年以降は 100~200 万 t というそれ以前に比べ非常に少ない量で推移するという結果が得られた。これは、切削オーバーレイの比率 (c_i) の上昇に伴い資材総投入量が減少し、道路内部からの建設廃棄物からなる再生材 ($I_{i,k,1}$) によって資材需要のほとんどが満たされるようになったためである。一方で副産物総排出量の減少により、道路外部へ排出される建設廃棄物量もケース 1、ケース 3 にくらべ低く抑えられるという結果になった。

ケース 1~4 について 1995~2030 年における累積の道路外部からの建設廃棄物受け入れ量、道路外部へ排出される建設廃棄物量、およびその差をとった結果を表-8 に示す。全てのケースで道路はネットで建設廃棄物の排出量のほうが多いという結果となった。ネットの排出量の削減に効果が大きかったのは、切削オーバーレイの比率 (c_i) を上昇させるケースであり、それに比較し再生材の利用量を増加させるケースは推計期間全体でみた場合に排出量の削減効果は小さかった。以上の結果から、建設廃棄物処分量の削減には、道路による再利用を促進すること以上に道路における修繕工事をより小規模な工事を多数回施工する方法に移行することの方が有効であるといえる。

(5) 考察

道路における建設廃棄物のマテリアルバランスが排出超過となる年度が 2000~2005 年という結果は、投入と排出のタイムラグを考慮せず、実際より早い年次で道路外部への建設廃棄物排出量が増加するようになっているためである。しかし、図-5、図-7 に示したように現状で既存ストックの更新のための資材需要が 82.9% を占め、路盤用碎石の既存ストック更新率が現状で 6.36% ということから、単純に考えても現時点で再生碎石として受け入れた廃棄物の 82.9% が 15.7 年後に同じ量だけ排出されるということになる。よって、道路は建設廃棄物の受け入れ先としては一時的な役割しか果たさず、道路における建設廃棄物のマテリアルバランスが排出超過となるのも間近であるという本研究の推計結果には一定の妥当性があるものと考えられる。

ただし、この推計で示した道路外部へ排出され

る建設廃棄物異物量 ($W_{i,as} + W_{i,rec}$) は全てが埋立て処分されるものではない。道路外部へ排出されても、道路外部で埋め戻し材等に再利用されるものは建設廃棄物とはならない。また本研究が対象とした道路とは、道路の舗装構造のみについてであり、路床や付属の構造物等は対象としていないため、工事現場内でこれらの部分に埋め戻し材等に再利用される場合でも本研究では道路外部への排出としてカウントされていることに注意されたい。

本研究では道路による建設廃棄物受け入れのポテンシャルを検討し、その結果はネガティブなものとなったが、このことは、建設廃棄物受け入れ先として道路の路盤材としてよりも道路以外での埋め戻し材等の利用が重要であると示唆していると考えられる。今後の建設廃棄物の受け入れ先として、道路外部のポテンシャルを評価することが必要であると考えられる。

6. 結論

本研究では道路について、マテリアルバランスのライフサイクル評価どわが国全体の道路のマテリアルフロー分析をおこなった。得られた結果を以下にまとめる。

- 1) マテリアルバランスのライフサイクル評価をおこなった結果、ライフサイクル全体で道路が建設廃棄物受け入れ先として最も効果的なはたらきをするシナリオ・ケースは、道路が初期建設段階から再生材を使用するケースで、修繕工事では小規模な工事を多数回施工するシナリオであった。
CO₂ 排出量についても評価をおこなったところ、新材・再生材による差は小さく、修繕工事の工法による差が大きかった。小規模な修繕工事をおこなうことは CO₂ 排出量抑制にも有効であることがわかった。
- 2) わが国全体の道路のマテリアルフロー分析をおこなった結果、1995 年において道路の資材需要の 82.9% は既存ストックの更新向け（修繕工事による需要）であると推定された。
- 3) 1995 年において、道路修繕工事の 80.4% が

表-8 2030 年までの建設廃棄物の累積のマテリアルバランス (億 t)

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
受け入れ量(1)	12.75	12.08	18.42	15.48
排出量(2)	19.97	14.96	22.56	16.21
差し引き((2)-(1))	7.21	2.88	4.14	0.72

大規模な打ち換え工であると推定された。このため現状において大量の路盤用砕石需要が発生していると推定された。

- 4) 2030年までのマテリアルバランスの将来推計をおこなった結果、道路が受け入れる建設廃棄物量より道路から排出される建設廃棄物量の方が大きく上回り、道路は建設廃棄物の受け入れ先としては一時的な役割しか果たさないことがわかった。排出される建設廃棄物量の抑制には切削オーバーレイの比率の上昇が有効であった。

謝辞：本研究をおこなうにあたり、ヒアリング調査でお世話になった方々に感謝の意を表します。

引用文献

- 1) (財)クリーン・ジャパン・センター：クリーンジャパン，Vol.136，pp.17-19，2000.
- 2) (財)通商産業調査会：砕石統計年報，1999.
- 3) 森口祐一：マテリアルフロー分析からみた人間活動と環境負荷，環境システム研究，Vol.25，pp.557-568，1997.
- 4) 天野耕二，牧田和也：舗装道路の建設と維持修繕に伴う環境負荷とコストのライフサイクル評価，土木学会論文集，No.657/VII-16，pp.57-64，2000.
- 5) 日本政策投資銀行：調査－都市再生と資源リサイクル，第33号，2002.
- 6) 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.
- 7) 橋本征二，広池秀人，寺島泰：コンクリートがらリサイクルの環境面からの評価，土木学会論文集，No.657/VII-16，pp.75-80，2000.
- 8) 建設省：平成7年度建設副産物実態調査，1997.
- 9) 建設省：平成12年度建設副産物実態調査，2001.
- 10) 黒田正和，渡辺智秀，山田智広：道路工事における地域骨材再利用計画，土木学会論文集，No.678/VII-19，pp.31-36，2001.
- 11) 建設省：道路統計年報，1999.
- 12) 全国道路利用者会議：道路ポケットブック，2000.
- 13) (財)日本道路協会：アスファルト舗装要綱，1982.
- 14) (財)日本道路協会：簡易舗装要綱，1980.
- 15) 山之口浩，丸山暉彦：アスファルト舗装修繕技術，山海堂，1997.
- 16) (財)経済調査会：道路工事の積算，1993.
- 17) (財)建設物価調査会：土木工事積算基準マニュアル（平成5年度版），1993.
- 18) (財)建設物価調査会：道路維持修繕の施工と積算，1993.
- 19) (財)日本アスファルト協会：アスファルト合材統計年報，1999.
- 20) (財)建設物価調査会：建設副産物の再生・処理の積算，1995.
- 21) 通産省大臣官房調査統計部：エネルギー生産需給統計年報，2000.

(2002. 7. 8 受付)

A STUDY ON THE MATERIAL BALANCE OF ROAD FOCUSED ON CONSTRUCTION WASTE IN JAPAN

Takuya HARA, Yoshikuni YOSHIDA and Ryuji MATSUHASHI

This paper quantifies environmental load of road works and total material flow of roads in Japan. We develop a mathematical model that calculates material flow of roads in Japan based on the ratio of two types of road repairing works: replacing and resurfacing. Total material flow is strongly influenced by the introduction scale of resurfacing that has the lower environmental impact. From the material balance of construction wastes, it is clarified that the road is just a temporal stock of construction wastes and the increase of resurfacing is effective to reduce the net construction waste from roads.