

# 鉄道のマテリアルフロー調査

鉄道のマテリアルフロー調査グループ\*

Investigation on the Material Flow of the Railway in Japan

Study group on the material flow of the railway

An investigation on the material flow of the railway in Japan was tried. This method is a system analysis tool for knowing the stock and the flow of the materials and substances quantitatively used in products and industries. Major materials such as cement, iron, copper, aluminum, polymers, etc. and the major components of the railway system have been selected as the objects of this investigation, in order to grasp the outline of the material flow of whole Japanese railways.

キーワード：マテリアルフロー分析（MFA）、鉄道、投入、蓄積、リサイクル

## 1. はじめに

地球温暖化や資源枯渇・資源リスクと言った地球規模の環境問題が顕在化する中、人間活動、事業活動に伴う物質や材料の流れ（マテリアルフロー）を定量的に把握しておくことの重要性が認識され、調査・検討が様々な観点、分野で進められつつある。

鉄道総研ではこれまで鉄道を構成する個々の要素（車両、軌道、構造物、電車線など）ごとに使われている材料の種類や構成比率などの調査やそれらに関するライフサイクルアセスメント（LCA）、また資源リスクが危惧される物質の鉄道における使用状況の調査を行ってきているが、鉄道分野全体としてのマテリアルフローについて、定量的な調査は行ってきていない。

ここでは、国内の鉄道全般を対象として、主な部材、材料についてその投入量、ストック量及び排出量に関する調査を行うことにより、大まかな全体像を把握し、資源の循環利用やリスクの観点から今後の材料開発、材料選択に関する判断に際しての留意点、方向性を検討した。

## 2. マテリアルフロー分析とは

マテリアルフローは、自然界の天然物質の流れや循環ではなく、人間社会における物質の流れを示す場合によく用いられる言葉である。特に環境分野におけるLCAなどに必要な物質の流れの評価や、資源分野における特定物質の流れの評価を行うための基礎資料として用いられている。

マテリアルフロー分析（MFA）は、図1に示すように、社会（国、地域）や事業分野に、ある期間（例えば1年間）に投入（インプット）、蓄積（ストック）そして排出（ア

ウトプット）される物質や材料を定量的に把握する手法である<sup>1) 2)</sup>。

MFAに必要なデータ（フロー（投入と排出）量や蓄積量など）の取得方法としては、

- 1) 直接的把握：全数調査またはサンプル調査により取得。政府や業界団体などが整備している統計資料など、
  - 2) 間接的把握：製品台数×素材原単位、総フロー量×素材構成率など、
  - 3) 差分により推計：把握されているプロセスの流入と流出に差があり、その差分が何らかのフロー量として特定できる場合、その差分から、新たなフロー量が得られる、
  - 4) 関係性から推計：化学量論により、投入または排出側の量からプロセスに投入された量を推計、または調査により何らかの関係性が把握できる場合、
  - 5) モデルにより推計：例えば、製品寿命分布から蓄積量と排出量の関係性を推計、
- などがある。

蓄積量の推計方法としては、

- 1) ボトムアップ手法：社会中の保有量（蓄積量） $S(t)$ を個々の製品ごとに積み上げる方法、

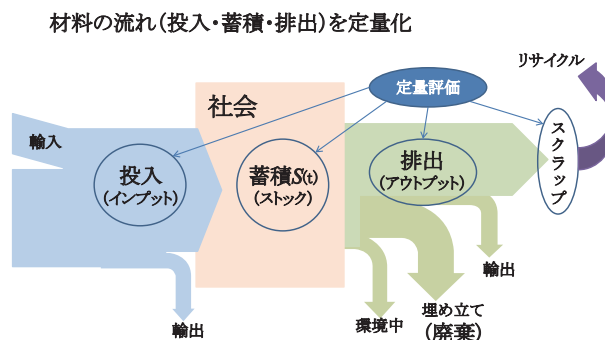


図1 マテリアルフロー分析（MFA）の概要

$S_i(t) = N_i(t) \times \omega_i$   
 $i$  : 製品種を示す添え字  
 $N_i(t)$  :  $t$  年期末の製品  $i$  の保有量  
 $\omega_i$  : 製品  $i$  中の対象物質あるいは素材の使用原単位  
 2) トップダウン手法: 投入量と排出量の差分から得られる蓄積増分, またはモデルを用いて推計する方法, に大別できる。

MFA の目的は図 2 に示すように,  
 ①資源循環性の評価,  
 ②物質のリスク評価,  
 である。前者は, 材料の循環実態を把握し, 対応策をとることによって循環利用率を向上させ, 天然資源消費や最終処分量の削減につなげる。後者は, 物質の経路などを把握することによって, 環境中への暴露量と発生源を明らかにしてリスク評価を行い, その低減対策の検討につなげる。

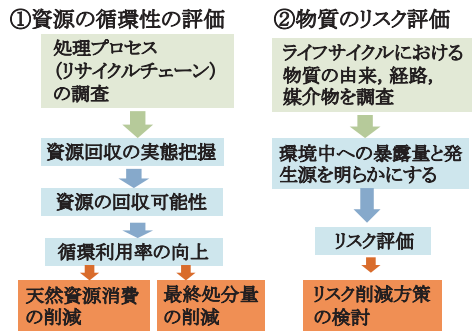


図 2 マテリアルフロー分析 (MFA) の目的

### 3. 調査の概要

調査は, いくつかの主要部材について, 材料構成, 投入量, 蓄積量を定量的に把握する。

調査活動は, 以下の手順で行う (図 3 参照)。

#### ①各部材のマテリアルフロー

担当している部材の年間投入量, 蓄積量および排出量を調査する。

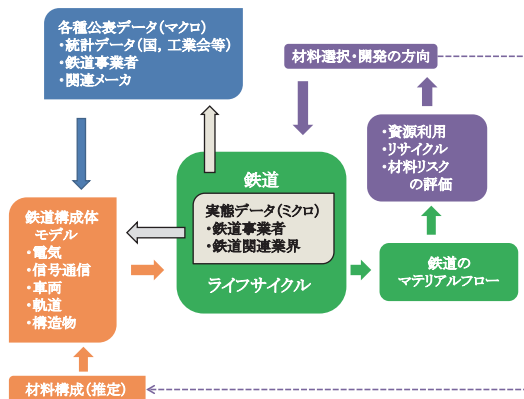


図 3 MFA 調査のプロセスフロー

- ・部材の構成を確認 (単一材, 部品構成)
- ・部材投入量 (年間) データの所在把握, データの入手可能性を検討 (関連業界)
- ・マテリアルとしての投入量, 蓄積量の算出
- ・使用後のフロー調査 (リサイクル, 廃棄等)
- ・各部材のマテリアルフローを整理 (リスク, リサイクルの課題などを抽出)

なお, 本調査は平成 23 年度を対象とした。

#### ②鉄道分野としてのマテリアルフロー

上記の各部材に関するマテリアルフローを統合し, 我が国の鉄道分野における概略のマテリアルフローとして取りまとめる。図 4 に鉄道のマテリアルフローの全体イメージを示す。

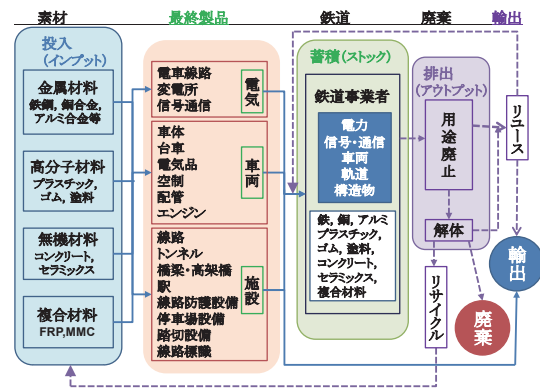


図 4 鉄道のマテリアルフローの概要

## 4. 調査結果

### 4.1 鉄道の基本データ

鉄道の MFA を行うためには, 鉄道で使われている製品, 部材を把握する必要がある。ここでは以前に実施した「鉄道材料の使用実態調査」を参考に分類した<sup>3)</sup>。図 4 の最終製品の項に鉄道の構成を示す。実際の調査では, 車両, 施設 (構造物・線路) と電気 (電力・信号通信) の大きく 3 つに分けて進めた。

一方, 鉄道の MFA に必要なデータとしては, 鉄道分野に投入, 蓄積, 排出 (リサイクルや廃棄) される種々の製品量である。これらに関するデータとしては, 鉄道統計年報<sup>4)</sup>がある。表 1 に示す「4 章 施設・車両」の各表に当該年度末の数量 (蓄積) が記載されている。車両については, 年間の生産両数に関する統計値が公表<sup>5)</sup>されており, 投入の数値となる。

### 4.2 鉄道のマテリアルフロー

#### 4.2.1 電力・信号通信関係

電力に関しては, 電車線路の電車線について調査した。信号通信については調査をしていない。部材としては電線と架線金具であり, 材料としては, 銅とアルミニウム

表1 鉄道統計年報のMFAに関連する基礎データ(4章の表)一覽

表No	タイトル	大分類項目
8	停車(留)場, 線路建造物, 立体交差, 枕木敷設延長, 道床延長表	トンネル, 橋りょう, 立体交差, 枕木敷設延長, 道床延長, 併用軌道の舗装延長
9	踏切道数及び軌道重量別軌道延長表	踏切道, レール重量別本線軌道延長
10	停車(留)場電気設備表	駅, (冷房, 換気, 排煙)設備設置駅, エレベータ, エスカレータ, 自動券売機, 印刷発行機, 自動集改札, 放送案内設置駅, 自動放送設置駅, 監視用TV設置駅, 構内通路
11	通信設備表	無線設備, 有線設備, 非常発報設備
12	信号保安設備表	閉そく方式別営業キロ, 連動装置, (ATS,ATC,ATO)装置設置営業キロ
13	踏切保安装置(電気式)設備表	踏切(支障報知, 集中監視, 交通信号機)装置踏切道
14	電路設備表	電車線こう長, き電線延長, 送電線延長, 配電線延長, 支持物
15	変電所設備表	変電所, 変成機器, 変圧器, 非常用発電機
16	車両現在両数表	機関車, 旅客車, 貨物車, 特殊車

である。架線金具は全て銅合金として評価した。表2に電車線のマテリアルフローを示す。

投入に対する蓄積の比から導かれる平均使用年数は銅, アルミニウム共に26.5年である。

4.2.2 車両関係

車両については, 車両構体, 内装などに使われている高分子材料, 輪軸や台車枠などの足回りやパンタグラフすり板などを対象とした。材料としては, 鉄, アルミニウム, 銅といった金属材料, 内装やブレーキの摩擦材に使われている高分子材料, そして油脂類やカーボンである。表3に車両のマテリアルフローを示す。

投入に対する蓄積の比から導かれる平均使用年数は17年である。個々の部材については, 新車に付属して投入された部材もあるため計算することが適切ではないと思われるが, 消耗部材を見ると, 油は2年強, すり板は1.5年程度で, ブレーキ摩擦材はブレーキディスクが約6年, 制輪子・ライニングが0.9~1.3年程度である。車両構体はステンレス車で30年, アルミニウム車で20年程度となっている。これは, アルミニウム車が新幹線で多く使われ, 20年程度で計画的に廃車されていることによると思われる。

4.2.3 構造物・軌道関係

構造物・軌道では, 重量として大きな比率を占めると想定されるコンクリートと鉄のみを対象とした。表4に構造物・軌道のマテリアルフローを示す。

構造物における投入と蓄積を比較すると後者は約420倍となっており, 単年度のデータではあるが, インフラとしての整備はほぼ終了して, 新たな建設がほとんどないことを示している。軌道では, レー

表2 電車線のマテリアルフロー(単位:t)

	分類	材料	投入	蓄積	リサイクル	廃棄
電車線	銅	銅	6,907	183,097	5,036	2,158
	アルミニウム	アルミ	224	5,938	163	70
架線金具	ハンガ	銅	—	3,606	—	—
	ドロップ		—	2,704	—	—
	ダブルイヤー		—	15,774	—	—
	フィードイヤー		—	397	—	—
合計			7,131	211,516	5,199	2,228

表3 車両のマテリアルフロー(単位:t)

	種別	材料	投入	蓄積	リサイクル	廃棄
車両構体	ステンレス製	鉄	4,921	159,439	914	102
	セミステンレス製	鉄	0	1,600	5,455	593
	アルミ合金製	アルミ	5,726	105,231	3,471	323
	鋼製	鉄	234	128,466	146	16
車両用高分子材料(内装等)		高分子	4,670	187,100	0	4,880
足回り	車輪	鉄	54,000	237,600	34,850	0
	ブレーキディスク	鉄	3,540	22,880	3,380	0
	車軸	鉄	1,240	60,720	2,230	0
	台車枠	鉄	12,177	660,000	26,708	0
	ライニング・制輪子	鉄	2,570	2,290	0	1,040
		銅	560	640	0	220
		高分子	1,540	1,920	0	630
	軸受	鉄	2,009	20,501	1,860	0
車軸軸受用グリース 主電動機軸受用グリース 歯車装置用ギヤ油	油	51.5	116.7	0	52.9	
		7.3	19	0	7.1	
		90.7	237	0	88.9	
すり板	カーボン系	カーボン	68.1	102.3	—	50.7
	銅系	銅	84.2	125	6.4	44.1
	鉄系	鉄	43.3	65	—	36.5
合計			93,532	1,589,052	79,020	8,084

すり板: 投入=国内向け製造量+輸入量, 蓄積=使用中すり板量+国内在庫量

表4 電構造物・軌道のマテリアルフロー（単位：万t）

	種別	材料	投入	蓄積	リサイクル
構造物 (コンクリート)	トンネル	コンクリート	8.6	13,100	—
	橋りょう		57	15,740	—
	駅		13.5	4,610	—
構造物 (鉄筋)	トンネル	鉄	0.6	900	—
	橋りょう		3.9	1,080	—
	駅		0.9	320	—
構造物 計			84.5	35,750	
軌道	レール	鉄	23.9	444	23.9
	まくらぎ	コンクリート	5.6	910	—
		鉄	0.1	20	—
軌道 計			29.6	1,374	23.9
合 計			114	37,124	24

ルの投入に対する蓄積の比から平均使用年数を計算すると18.6年になる。投入では、構造物は軌道の約2.7倍であるが、蓄積では、約26倍である。

#### 4.2.4 鉄道の構成体別マテリアルフロー

鉄道の構成体別マテリアルフローを表5に示す。

構成体別にみると、蓄積では構造物が約96%となり、軌道を含めると99%を超える。投入では、構造物が7割弱を占め、軌道を含めると9割を超える。以上のように材料の量でみると鉄道は圧倒的に地上設備の比率が高い産業であることが明らかである。

各構成体の蓄積(S)とフロー(=投入(I))の関係(I/S)をみるとメンテナンスで消耗部材を交換している電車線や軌道は、数%であり、それに加えて寿命などにより車両交換を行っている車両は6%程度となっている。構造物は比率がそれらに比べて1桁小さい。

電気は、電車線路、変電所や信号通信関係に分類される。今回調査の対象としたのは電車線路の中の線条類と架線金具類である。電車線路には、そのほかに重量的には大きいコンクリート製や鉄製の電車線柱、また線条類よりは重量が少ないと思われる絶縁のための碼子などがある。今回の調査対象外とした変電所や信号通信関係は電車線路全体に比較すると重量は小さいと思われるが、弱電関係の機器も多く含まれるためレアメタルを始め種々の材料が使われていると思われる。電気全体の中で

表5 鉄道の構成体別マテリアルフロー（単位：t）

構成体	投入 [I]	蓄積 [S]	排出	I/S (%)	リサイクル	廃棄
電車線	7,131	211,119	7,427	3.4	5,199	2,228
車 両	93,532	1,589,052	87,104	5.9	79,020	8,084
構造物	845,000	357,500,000	—	0.2	—	—
軌 道	296,000	13,740,000	239,000	2.2	239,000	—
合計	1,241,663	373,040,171	333,531	—	323,219	10,312

今回把握した量は、1～2割程度と考えられる。

車両に関しては、車両構体、車両用高分子材料（内装等）、足回り（台車、輪軸、ブレーキ、軸受、油）、パンタグラフすり板を対象として調査を行った。従って、車体では連結器や窓ガラスなどが、また、電気品や空配、配管、エンジンが対象外となっている。全体の重量としての把握率は、概ね6～7割と思われる。

構造物は、コンクリートを主体として把握しており、盛土の土砂などは集計していない。それらを除くと重量全体としては9割以上を把握していると考えられる。駅では近年空調や自動改札機、自動券売機などの機械の導入が進んでいるが、今回は対象外としている。

軌道は、レールとまくらぎを対象としており、締結装置や踏切設備などが対象外となっているが、全体重量としては、8～9割を把握したと考えている。

以上をまとめると、蓄積としては大きな比率を占める構造物の把握率が9割を超えていると考えられるので、鉄道全体としても9割程度となっていると考えられる。投入としては8割程度と考えられる。

把握率の低い構成体については、過去の使用実態調査における個々の車両や線区の詳細な結果に基づく未調査部分の想定や各種統計で数量把握ができていない部材に関する材料構成の調査や想定などにより積み上げていく方法がある。

#### 4.3 材料別マテリアルフロー

以下、材料別に整理した結果を示す。

##### (1) コンクリート/セメント

コンクリートのマテリアルフローを表6に示す。投入が多いのは、橋りょうであり、蓄積が多いのは橋りょうとトンネルである。なお、今回の解析では、廃棄はほぼないとした。

生産統計量と比較するためにコンクリートをセメントに換算した。平成23年度の内需に対する鉄道への投入量は、0.23%である。蓄積については、日本全体の数値を確認できていないが、下記の鉄の状況などを考慮すると鉄道の比率が投入よりも高いと推定される。

##### (2) 鉄

鉄のマテリアルフローを表7に示す。投入では、レールが全体の6割強を占め、次いで車両が2割強となっている。蓄積では、構造物が8割弱を占め、レールを加えた構造物・軌道全体では9割を超える。

日本全体に対する鉄道の比率は、投入では0.41%、蓄積では2.22%であり、鉄道がインフラとしては成熟段階にあることを示している。

表6 コンクリート/セメントのマテリアルフロー (単位:千t)

	種別	投入	蓄積
構造物	トンネル	86	131,000
	橋りょう	570	157,400
	駅	135	46,100
軌道	まくらぎ	56	9,100
コンクリート合計		847	343,600
セメント 換算※	鉄道合計	111	44,833
	日本内需	47,705	

※換算は単位セメント量を 300 kg (300 kg/m<sup>3</sup>) とした

(3) 銅

銅のマテリアルフローを表8に示す。銅は電線、架線金具と摩擦材(ブレーキ、すり板)に使われ、投入、蓄積共に9割程度を電線が占めている。電線は、全てがリサイクルされていると仮定した。

(4) アルミニウム

アルミニウムのマテリアルフローを表9に示す。電線と車両構体が対象でリサイクル率は

リサイクル率=リサイクル/(リサイクル+廃棄)によると、約9割である。

電線に対する車両構体の量は、投入が26倍、蓄積が18倍である。

(5) 高分子材料

車両で使われている高分子材料のマテリアルフローを表10に示す。車両の内装などで使われているものとブレーキの摩擦材として使われているものを対象としており、投入では前者が後者の3倍程度、蓄積では同じく10倍弱となっている。

(6) 油類

軸受の潤滑剤として利用されているグリースや油を調査した結果を表11に示す。いずれもリサイクルはされず全量廃棄される。投入に対して蓄積は約2.5倍である。

分類別では、歯車装置用ギヤ油の量が投入、蓄積共に最も多く、続いて車軸軸受用グリース、そして主電動機用軸受用グリースの順になっている。

(7) カーボン

カーボンのマテリアルフローを表12に示す。パンタグラフすり板に含まれるカーボン量を調査対象とした。現在は、リサイクルされず廃棄されている。

(8) 鉄道の材料別マテリアルフロー

鉄道全体の材料別マテリアルフローの結果を表13に示す。材料毎に多い順は、

投入:鉄>セメント>銅>高分子材料>アルミニウム>油>カーボン

表7 鉄のマテリアルフロー (単位:t)

	種別	投入	蓄積	リサイクル	廃棄
構造物 (鉄筋)	トンネル	5,860	9,000,000	—	—
	橋りょう	39,010	10,800,000	—	—
	駅	9,280	3,200,000	—	—
軌道	レール	239,000	4,450,000	239,000	0
	まくらぎ	1,240	200,000	—	—
車両 構体	ステンレス製	4,921	159,439	914	102
	セミステンレス製	0	1,600	5,455	593
	鋼製	234	128,466	146	16
足回り	車輪	54,000	237,600	34,850	0
	ブレーキディスク	3,540	22,880	3,380	0
	車軸	1,240	60,720	2,230	0
	台車枠	24,350	1,320,000	53,420	0
	ライニング・制輪子	2,570	2,290	0	1,040
	軸受	2,009	20,501	1,860	0
すり板	鉄系	43.3	65	—	36.5
鉄道合計		387,297	29,603,561	341,255	1,788
日本内需 2012 (×10 <sup>3</sup> )		95,580	1,331,210	21,440	

表8 銅のマテリアルフロー (単位:t)

	分類	投入	蓄積	リサイクル	廃棄
電線	銅	6,907	183,097	7,194	0
架線 金具	ハンガ	—	3,606	—	—
	ドロップ	—	2,704	—	—
	ダブルイヤー	—	15,774	—	—
	フィードイヤー	—	397	—	—
足回り	ライニング・制輪子	560	640	0	220
すり板	銅系	84.2	125	6.4	44.1
鉄道合計		7,551	206,343	7,200	264
日本内需 2012 (×10 <sup>3</sup> )		949			

表9 アルミニウムのマテリアルフロー (単位:t)

	分類	投入	蓄積	リサイクル	廃棄
電線	アルミニウム	224	5,938	163	70
車両構体	アルミ合金製	5,726	105,231	3,471	323
合計		5,950	111,169	3,634	393

表10 高分子材料のマテリアルフロー (単位:t)

	分類	投入	蓄積	リサイクル	廃棄
車両用高分子材料		4,670	187,100	0	4,880
足回り	ライニング・制輪子	1,540	1,920	0	630
合計		6,210	189,020		5,510

蓄積：セメント＞鉄＞銅＞高分子材料＞アルミニウム＞油＞カーボン

であり、1、2位の鉄とセメント以外の材料の順番は同一である。上位の2材料はそれ以下の材料に比べて1～2桁以上、量が多い。

リサイクルに関しては、鉄は99%以上、銅は96%、アルミニウムは90%となっている。油や高分子材料はリサイクルされてない。

廃棄やリサイクル等の排出は殆ど発生していないとの前提を置いたセメント以外は、投入と排出の量がほぼバランスしていると思われ、蓄積の大きな変動は生じておらず、フローとしてはほぼ定常的な状態にあるといえる。

## 5. おわりに

鉄道分野で使われている主な材料についてのマテリアルフロー分析を試みた。容易に入手可能な各種統計データやこれまでの各種調査で把握した材料の使用実態などにに基づき集計を行った。

鉄道の構成体別にみると構造物はセメントを中心に9割程度把握できていると思われるが、設備機器類を中心に把握できていない部分も多く残された。車両は電気品、空制品等の把握ができておらず6～7割程度に留まったと考えられ、電気は電車線のみ調査であり、1割程度であると思われる。

材料別にみるとセメントや鉄は実態の8～9割程度まで把握できたと思われる。その他の材料については銅やアルミニウムは6～7割、高分子、油、カーボンは1～3割程度と思われる。

セメント、鉄、銅などの今回の結果から、鉄道分野の日本全体における位置づけを見てみると、蓄積では数%程度、投入ではその1/10程度と評価できた。

今回の調査で残された課題としては、把握率の向上、レアメタルなどの材料の実態把握、経年変化・動向の把握が挙げられる。今後、取り組みを進めていきたいと考えている。

## 謝辞

本調査を進めるにあたり、ご指導、ご助言をいただいた東京大学大学院 松野泰也准教授に謝意を表します。

表 11 油類のマテリアルフロー（単位：t）

	分類	投入	蓄積	リサイクル	廃棄
足回り	車軸軸受用グリース	51.5	116.7	0	52.9
	主電動機軸受用グリース	7.3	19	0	7.1
	歯車装置用ギヤ油	90.7	237	0	88.9
合計		149.5	372.7		148.9

表 12 カーボンのマテリアルフロー（単位：t）

	分類	投入	蓄積	リサイクル	廃棄
すり板	カーボン系	68.1	102.3	—	50.7

表 13 鉄道分野の材料別マテリアルフロー（単位：t）

材 料	投入	蓄積	排出	リサイクル	廃棄
セメント	111,000	44,833,000	—	—	—
鉄	387,297	29,603,561	343,033	341,255	1,788
銅	7,551	206,343	7,464	7,200	264
アルミニウム	5,950	111,169	4,027	3,634	393
高分子材料	6,210	189,020	5,510	0	5,510
油	150	373	149	0	149
カーボン	68	102	51	—	51

$$[排出] = [リサイクル] + [廃棄]$$

## 文 献

- 1) 足立芳寛, 松野泰也, 醍醐市朗: マテリアル環境工学, 東京大学出版, 2010.9
- 2) 足立芳寛, 松野泰也, 醍醐市朗, 瀧口博明: 環境システム工学, 東京大学出版, 2004.4
- 3) 調査報告 鉄道用材料の使用実態と動向, 鉄道総研報告, Vol.6, No.12, pp.1-6, 1992
- 4) 国土交通省鉄道局監修: 平成23年度鉄道統計年報, 株式会社電気車研究会, 平成26年3月
- 5) 2013年度鉄道車両等生産年報, 日本鉄道車輛工業会, 2014.11

\*「鉄道のマテリアルフロー調査グループ」メンバー

主査 相原直樹 (材料技術研究部)

上東直孝, 太田達哉 (材料技術研究部)

鶴田孝司, 鈴木浩明 (コンクリート材料)

伊藤幹彌, 柘田吉弘 (防振材料)

岡村吉晃, 木川定之 (潤滑材料)

兼松義一, 宮平裕生, 池内健義 (摩擦材料)

福本祐介, 小林祐介 (超電導応用)

オブザーバー 曾根康友 (材料技術研究部)

辻村太郎 (研究開発推進部) 代表執筆者