

# 鉄道用材料の LCA による環境評価

相原 直樹\*      辻村 太郎\*  
上原 元樹\*\*      土屋 広志\*\*\*

## Environmental Assessment for Materials in the Railway

Naoki AIHARA      Taro TSUJIMURA  
Motoki UEHARA      Hiroshi TSUCHIYA

A global environment problem represented by global warming is seriously concerned about. Therefore, a concrete and effective action is demanded of each company and each person. For example, it is necessary for transportation enterprises to reduce more environmental load generated by their transportation systems. On the other hand, it is necessary for users to try to reduce the environmental load through their transportation means choice. In order to achieve these, it is wanted that the environmental load of the transport service should be grasped and quantified. Life cycle assessment (LCA) is one of the techniques of the quantification. In this report, it is explained for what purpose LCA is applied to railroad material and how the evaluation result is presented.

キーワード：LCA, インベントリ分析, 環境評価

### 1. はじめに

二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) 等の排出による地球温暖化に代表される地球環境問題が深刻になっている。一例として、IPCC (気候変動に関する政府間パネル) による第四次報告書により、地球の平均気温が人為的要因により上昇していることはもはや確実と指摘されている。また、砂漠化、北極海の氷量の減少といった現象の顕在化や、これらに伴う今後の伝染病や洪水の増加についても報告されている。近年、日本においては台風の接近数の増加、集中的豪雨の増加が見られる。これらは、現在のところ地球温暖化が原因とまでは断定されていないが、少なくとも温暖化の進行がこのような現象に寄与するとまでは言えるだろう。

このようなことから、地球温暖化抑止に向けた具体的かつ効果的な行動が、企業レベル、個人レベルで求められている。日本においては、3R 活動、すなわちリデュース (減量)、リユース (再使用)、リサイクル (再利用) という主に3つの考え方により、省資源、省エネルギーを推進している。輸送部門に絞って考えれば、輸送事業者は輸送事業による環境負荷をいかに実際に低減させるか、個人では輸送手段選択の際に環境負荷に対する考慮を行い、実際の低減につながっているかなどが問われるであろう。

近年は、企業等組織には企業の社会的責任 (CSR) と言われる考え方が普及しつつある。従来、企業の責任と言えば、顧客に対するものであり、製品、サービスの提供とその対価に力点のほとんどが置かれていた。しかし、現在は、顧客に留まらないあらゆる利害関係者 (ステークホルダー) への対応が求められつつある。具体的に言えば、CSR とは、あらゆる利害関係者に対し、経済 (経営) 的側面、社会的側面、環境的側面等、多様な側面から対応するということを指す。輸送事業者であれば、これに安全的側面が加わる。また、これらについて、利害関係者に誤解無く事柄を伝えるには、定量化された情報を持つことが望まれる。このようなことから、輸送サービスの環境負荷の定量化は今後ますます注目されていくだろう。

輸送サービスの環境負荷といえば、車両運行時の消費エネルギーが最も多く採り上げられ、かつ、最も量が大きく重要である。一方、環境負荷はこれだけではなく、鉄道を構成する要素に投入される材料も挙げられる。各材料を使用するためには、原料の採掘から製造、輸送のプロセスがあり、資源消費とエネルギー消費がなされるからである。その定量化の手法の一つとしてライフサイクルアセスメント (LCA) がある<sup>1)</sup>。LCA は、原材料の採取から運搬、素材の製造、部品の組み立て、製品の製造、そして製品の使用やサービスの提供、最後の廃棄、リサイクルと言ったライフサイクルの各段階 (ライフステージ) でどれだけの資源・エネルギーを投入し、廃棄物・

\* 材料技術研究部

\*\* 材料技術研究部 (コンクリート材料)

\*\*\* 材料技術研究部 (摩擦材料)

特集：材料技術

排出物質を出しているかを集計する。これにより、どのライフステージで排出物質が多いかを特定し、今後の製品開発、またはメンテナンスなどで対策を講じることがしやすくなる。

本報告では、材料のLCAについて概説を行い、コンクリートとパンタグラフ用すり板について材料を変更した際の環境負荷の変化について報告する。

2. インベントリと原単位

一口に環境と言うが、環境負荷にはCO<sub>2</sub>、フロン類、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>等の化学的なもの、騒音、振動等の物理的なもの、社会的なもの等、様々なものが存在する。従前はこれらの様々な環境負荷を個別に管理するしかなかった。現在でもその傾向は続いているが、その一方で種類の異なる環境負荷を同じ次元の数値で表し、可能な限り統合しようとする手法が提案されてきている。

一例として、図1に（独）産業技術総合研究所ライフサイクルアセスメント研究センターが開発した被害算定型ライフサイクル環境影響評価手法（LIME2）の考え方を示す。この図には、環境負荷物質等（当図のインベントリ）とそれに伴う環境影響（当図の影響領域、カテゴリエンドポイント）が示されている。

「インベントリ」（環境負荷項目）としては、CO<sub>2</sub>、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>やPM（粒子状物質）、さらには騒音など19項目を挙げている。それらによって引き起こされる「影響領域」として地球温暖化を初めとしてオゾン層破壊、有害物質や化石燃料消費など15項目が挙げられている。次の「カテゴリエンドポイント」には、例えば地球温暖化によ

て影響を受ける感染症、災害被害、農作物など18項目がある。次の「保護対象」は人間健康、生物多様性など4項目を挙げ、最終的にはそれらを重み付けして単一指標へと「統合化」している。各ステップ間、例えばCO<sub>2</sub>と地球温暖化の間は地球温暖化係数でその関係を定量化している。

現在は、地球温暖化問題が大きな話題となっており、当面はこの解消に重点が注がれている。しかし、中長期的に見れば、私たちは、これらのどの環境影響についても継続的に注意を払うべきであろう。

これらの環境負荷物質等の発生は、大抵の場合、材料およびエネルギーの消費によって起こる。材料の場合、その製造時にエネルギーを使用するため、製造者側で環境負荷物質が発生する。材料を単位量（1kgなど）あたり製造するときに、発生する環境負荷物質の量を製造時排出原単位と呼ぶ。

製造時排出原単位については、国内外にいくつかのデータベースが存在する。材料の製造の環境負荷は、製造国、事業者、使用国までの輸送等が複雑に関係することや情報公開の有無の事情もあるため、いずれのデータベースも収納する原単位の数には限りがある。このため、原単位の選択については、予め方針を定めることが望ましい。筆者らは現在のところ、概ね、以下の基準により原単位を選択することとしている。

- a) 特に精緻化が必要とされる場合は、その材料の業界団体が公式に提示（LCA日本フォーラムのLCAデータベース等）する最新の値を用いる。
- b) 上記以外の材料は、LCAアプリケーションとして普及

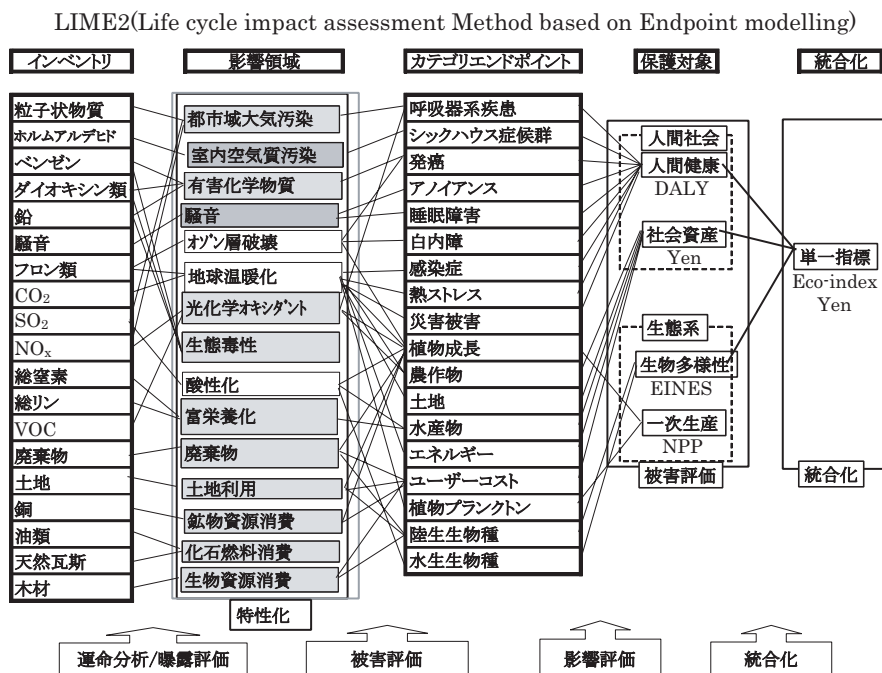


図1 LIME2における環境負荷の統合化の流れ<sup>2)</sup>

している JEMAI-LCA Pro（オプションデータパックを含む）の値を用いる。

- c) 上記のデータベースに存在しない材料の場合は、他の文献値、聞取調査に基づく値を用いるか、これらの既知の値を用いて独自算出を行う。

表1に製造時排出原単位の例を示す。（なお、これらの値は前述の通り複数の団体により異なる値が提案されており、実際の使用には慎重な検討が必要である。）

一般に、反応性に富む物質は製造するためにより多くのエネルギーを費やす。例えばアルミニウムは、鉱石から金属にする際のエネルギーが、鉄に比べて大きくなる。同じ機能を同じ重量で果たすならば、原単位の小さい材料の方が小さい環境負荷となる。

表1 製造時排出原単位の例

項目名	製造時排出原単位 (kg-inventory/kg)		
	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>
冷延鋼板の製造	1.43	1.49 × 10 <sup>-3</sup>	9.07 × 10 <sup>-4</sup>
伸銅製品（電気銅製造および伸銅プロセス）	1.49	1.37 × 10 <sup>-3</sup>	5.92 × 10 <sup>-3</sup>
アルミ板大型型材（新地金）	10.16	3.12 × 10 <sup>-2</sup>	7.72 × 10 <sup>-2</sup>
亜鉛	2.76	3.14 × 10 <sup>-3</sup>	3.26 × 10 <sup>-3</sup>
高密度ポリエチレン	1.26	2.60 × 10 <sup>-3</sup>	2.73 × 10 <sup>-3</sup>
ポリ塩化ビニル	2.75	1.59 × 10 <sup>-3</sup>	2.04 × 10 <sup>-3</sup>
ナイロン6	3.91	1.89 × 10 <sup>-3</sup>	2.61 × 10 <sup>-3</sup>
エポキシ樹脂	5.30	2.44 × 10 <sup>-3</sup>	3.14 × 10 <sup>-3</sup>
ポリウレタン（硬質ウレタンボード）	2.94	1.59 × 10 <sup>-3</sup>	1.83 × 10 <sup>-3</sup>
ポリウレタン（発泡）	1.87	9.96 × 10 <sup>-4</sup>	1.19 × 10 <sup>-3</sup>
天然ゴム	0.203	2.71 × 10 <sup>-4</sup>	3.80 × 10 <sup>-4</sup>
スチレンブタジエンゴム（SBR）	3.11	1.48 × 10 <sup>-3</sup>	2.93 × 10 <sup>-3</sup>
ガラス	1.18	6.35 × 10 <sup>-4</sup>	1.20 × 10 <sup>-3</sup>
一般磁器	0.94	2.93 × 10 <sup>-4</sup>	5.06 × 10 <sup>-5</sup>
ポルトランドセメント	0.746	1.51 × 10 <sup>-3</sup>	6.30 × 10 <sup>-5</sup>

しかし、実際はそうではなく、各材料にはそれぞれ使用するための機能、利点がある。例えば、アルミニウムは鉄よりも比重が小さく、使用の仕方によっては軽量化の可能性がある。また、リサイクルのしやすさも考える必要がある。製造時排出原単位が大きくても、リサイクルを行えば、最終的な排出量は減る。さらに、先端材料と呼ばれる材料を用いることにより、全体的な材料使用量、エネルギー使用量を減らせるのであれば、通常はその方が良いであろう。

### 3. レア金属問題への配慮

一方、材料について、今後さらに注意を払うべきこととして、レア金属の問題がある。レア金属にはいくつかの定義があるが、狭義の意味としては鉄、銅、亜鉛、アルミニウム等のベース金属や金、銀等の貴金属以外で、産業に利用されている非鉄金属31種を指す<sup>3)</sup>。

レア金属は単体で大量に使うことはあまりなく、専ら、合金、添加剤に微量含まれていたり、化学合成用触媒として使われる。このため、製品中でどのようなものが使われているか目立たないことがほとんどである。しかし、その製品を大量に使えば、当然レア金属の使用量も比例して増えてくる。また、生産が追いつかなかつたり、採掘できる量が減ってくれば、まず、価格の急激な上昇につながり、さらに、使用が困難になることも考えられる。従って、中長期的視点に立った場合、レア金属が使われている材料、製品については、どのようにこれらを継続していくかに注意を払う必要がある。

### 4. 材料変更のLCAの例

ある製品に新しい材料を導入しようとする。これは、その材料を使うことにより、今までと比べて何かを良くするという目的、理由がある。例えば、コストの削減、利便性の増加、環境負荷の削減などが挙げられる。これらの良さを評価する際には、ただ良いというだけでなく、既に述べたように、製造、使用、メンテナンス、処分等といったライフサイクルにおいて、以前より向上しているかを把握することが重要である。環境負荷については、実現可能な範囲において、LCAの観点から検討していくと良いと考えられる。

以下、新しい材料の導入におけるLCAの事例を示す。

#### 4.1 ジオポリマーコンクリートによる環境負荷低減の評価

材料を変更することによる、環境負荷への影響評価の一例として、ジオポリマーコンクリートについて紹介する。一般的なコンクリートは、図2に示すように、セメントと骨材に水を加えて混合し、その水和反応により硬化体を作製する。おもな構成元素はCa（カルシウム）、Si（ケイ素）、Al（アルミニウム）等であり、カルシウムケイ酸塩水和物（C-S-Hといわれる）がセメント水和物組織の主要成分である。一方、ジオポリマーコンクリートは、ミキサーで混合攪拌して、型枠に詰めて硬化体を作製する工程は一般的なコンクリートと全く同じであるが、セメントの代わりに石炭灰等を、水の代わりに水ガラス（ケイ酸アルカリ水溶液）を使用する点で一般的なコンクリートと異なる。また、その構成元素はSiやAlに

特集：材料技術

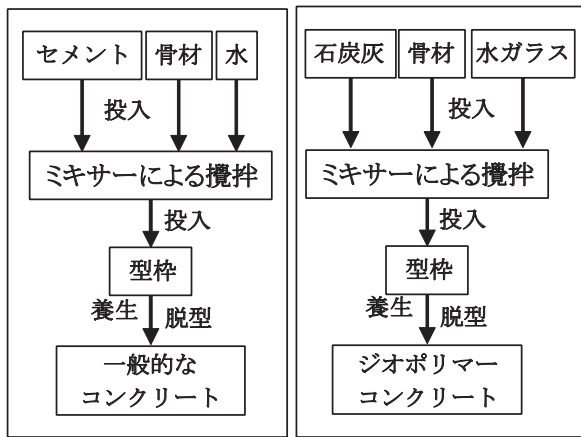


図2 ジオポリマーコンクリートと一般的なコンクリートとの作製法の比較

加えて、Caの代わりにNa（ナトリウム）やK（カリウム）を多く含み、主要成分がいわゆるゼオライト（沸石）のようなアルミノケイ酸塩となる点で、一般的なコンクリートと異なる。セメントの代わりに石炭灰を使用することで、製造時のCO<sub>2</sub>排出量を削減することが期待できる<sup>4)</sup>。

ジオポリマーコンクリートも、普通コンクリートと同様に、目的に応じて様々な配合が考えられる。ここでは、PCまくらぎ向けのコンクリートについて1m<sup>3</sup>あたりの製造に伴う排出量の評価を行うこととする。なお、鉄筋、実際のまくらぎの成型、および、使用段階以後については環境負荷がほぼ同等と考えられるため、評価を割愛することとした。

CO<sub>2</sub>排出量原単位は、前述した基準により、いくつかのデータベースまたは文献値から、その材料に相応しいと考えられるものを選択した。早強セメントは、LCA日本フォーラムのLCAデータベースの値（ポルトランドセメント）を参照した。水ガラスおよび水酸化ナトリウムはJEMAI-LCA Proによった。石炭灰、細骨材、粗骨材は上記二つのデータベースには原単位が収録されていない

表2 PCまくらぎ用の各コンクリートの成分表

原料	PCまくらぎ用 普通コンクリート	ジオポリマー コンクリート	使用した CO <sub>2</sub> 原単位 <sup>5)</sup> (kg-CO <sub>2</sub> /kg)
早強セメント	457kg	-	0.7455
石炭灰	-	545kg	0.0179
水ガラス	-	95kg	0.4330
水酸化ナトリウム	-	40kg	0.9076
水道水	160kg	115kg	(ゼロ扱)
細骨材	640kg	904kg	0.0034
粗骨材	1084kg	786kg	0.0028
混和剤	数 kg	数 kg	(ゼロ扱)
合計	約 2350kg	約 2490kg	

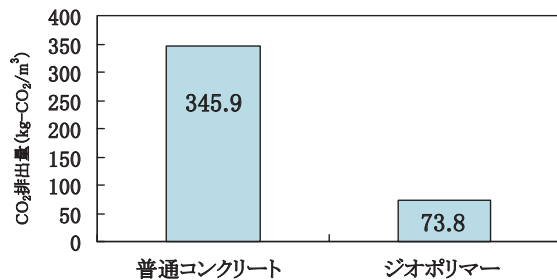


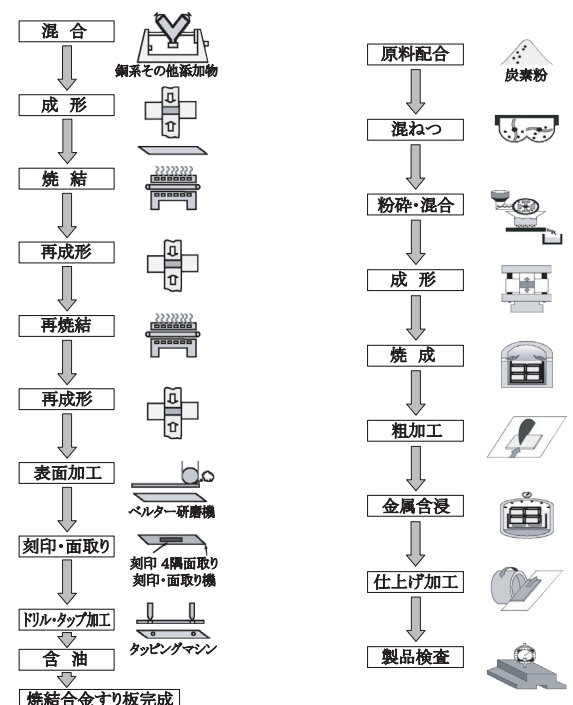
図3 各コンクリートのCO<sub>2</sub>排出量  
(1m<sup>3</sup>あたり, PCまくらぎ用途を想定)

ため、文献5)の値によることとした。水道水と混和剤は原単位をゼロと見なした。これらのCO<sub>2</sub>原単位の値を表2に示す。

主な原料を比較すると、早強セメントに比べ、石炭灰のCO<sub>2</sub>原単位が大変小さいことがわかる。これらのデータから、積算を行った結果を図3に示す。ジオポリマーコンクリート製造でのCO<sub>2</sub>排出量は、普通コンクリートの約21%となり、大幅な排出抑制となることがわかった。

4.2 カーボン系すり板導入による環境負荷低減の評価

環境負荷への影響評価のもう一つの例として、カーボン系すり板の導入を採り上げた。在来線のすり板には、銅系焼結合金が使われてきていたが、1990年ごろから相手側のトリロ線に対する影響が少ないカーボン系すり板が採用されるようになってきている。導入の最大の目的は、トリロ線の摩耗量減少や波状摩耗発生への減少による



(a) 銅系焼結合金すり板製造法 (b) 金属含浸製造法

図4 パンタグラフすり板の製造プロセス

張替え工事の減少による保守経費削減である。それぞれのすり板の製造プロセスを図4に示す<sup>6)</sup>。

ここでは、仙石線における銅系焼結合金からカーボン系材料に変更、及び、そのトータルコスト評価の事例<sup>7)</sup>を用いて、LCAを行うこととした。評価範囲を図5に示す。すり板の変更により、その摩耗量は増大し、取替量も増えるが、一方、トロリ線の摩耗量は減少する。表3にすり板、舟体、補助すり板等の取替数等を示す。

各すり板および固形潤滑剤の材質の内訳を表4～表6に示す。

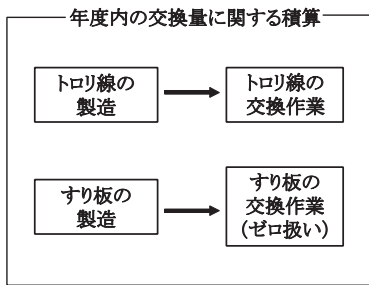


図5 すり板LCAの評価範囲

表3 すり板、舟板、補助すり板の交換実績

区分	部品	取替量(本)
投入前	すり板	248
	舟板	7
	補助すり板	248
	固形潤滑剤	124
投入後	すり板	400
	舟板	4
	補助すり板	400

表4 各すり板の材料内訳

品名	材料	質量(kg)
焼結合金すり板	BC	0.475
カーボン系すり板	摩擦材	PC78 0.6
	さや	鉄 0.15
舟体(焼結用)	アルミ	1.8
舟体(カーボン用)	アルミ	2.1
補助すり板	アルミ	0.175
固形潤滑剤(白色)	T-270W	0.1

表5 各すり板の元素別比率<sup>8)</sup>

すり板	Cu	Sn	Fe	Ni	その他金属	C	wt%
BC	72.4	8.79	8.67	4.25			94.11
PC78	47.9	1.63			6.94	43.53	100

表6 固形潤滑剤の含有物質内訳

固形潤滑剤	PFA	樹脂	ワックス	その他
T270W	6	35	55	4

一方、トロリ線の平均摩耗による張替作業および波状摩耗に伴う割入作業の実績を表7に示す。いずれも投入後の方が量が少ない。

表7 トロリ線平均摩耗による張替作業および波状摩耗に伴う割入作業実績

区分	張替作業	割入作業
	トロリ線取替量(m)	割入箇所(箇所)
投入前	17000	35
投入後	12019	8

すり板用材料のCO<sub>2</sub>排出原単位について、この評価では表8に示す値を用いた。このうち、銅についてはバルク体の原単位しか見出せなかったことから、JEMAI-LCA Proの原単位を基礎とし、伸銅製品とするエネルギーについて筆者らが調査した値を加算したものとした。

表8 すり板用材料で用いたCO<sub>2</sub>排出原単位

材質	CO <sub>2</sub> 排出原単位(kg-CO <sub>2</sub> /kg)	備考
銅	1.49	注1
鉄	1.43	LCA日本フォーラム
炭素	5.59	注2
アルミニウム	10.16	注3
PFA	3.91	注4
樹脂	5.3	注5
ワックス	0	僅少のためゼロ扱い

注1：JEMAI-LCA Proの原単位を基礎とし、伸銅製品とするエネルギーについて筆者らが独自調査した値を加算したものとした。  
 注2：JEMAI-LCA Proの炭素棒の値とした。  
 注3：LCA日本フォーラムの示す値のうち、アルミニウム新地金製造工程に大型形材加工の値を加算したものとした。  
 注4：JEMAI-LCA Proのナイロン6の値とした。  
 注5：JEMAI-LCA Proのエポキシ樹脂の値とした。

トロリ線材料および作業のCO<sub>2</sub>排出原単位について、この評価では表9に示す値を用いた。このうち、トロリ線については、銅の原単位を適用することとしたが、合金であることを考慮し、実重量の98%を乗ずることとした。

表9 トロリ線および作業で用いたCO<sub>2</sub>排出原単位

材質(単位)	CO <sub>2</sub> 排出原単位(kg-CO <sub>2</sub> /単位量)	備考
銅(kg)	1.49	注1
張替作業(m)	8.50 × 10 <sup>2</sup>	筆者らの調査
割入作業(回)	0	注2

注1：JEMAI-LCA Proの原単位を基礎とし、伸銅製品とするエネルギーについて筆者らが独自調査した値を加算したものとした。また、本評価でのトロリ線への適用においては、実重量の98%を乗ずることとした。  
 注2：エネルギー消費量が僅少であるためゼロ扱いとした。

特集：材料技術

表 10 投入物質量及びCO<sub>2</sub>排出量

物質名	投入前		投入後	
	質量 (kg)	CO <sub>2</sub> 排出量 (kg-CO <sub>2</sub> )	質量 (kg)	CO <sub>2</sub> 排出量 (kg-CO <sub>2</sub> )
銅	95.4	142.1	134.4	200.3
鉄	15.3	21.9	60	85.8
炭素	7.1	39.7	105.6	590.3
アルミニウム	56	569	101.5	1031.2
PFA	0.744	2.9	0	0
樹脂	4.34	23	0	0
ワックス	6.82	0	0	0
すり板小計		799		1908
銅	16643	24798	11767	17532
張替作業	-	1445	-	1022
トロリ線小計		26243		18554
合計		27041		20462

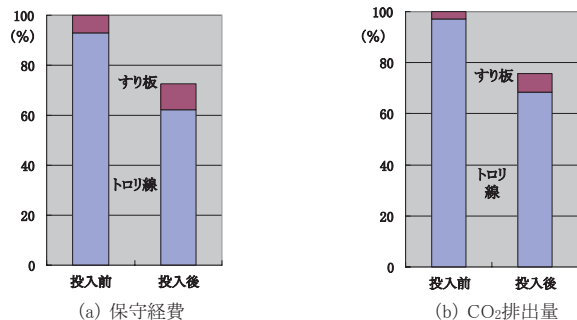


図 6 カーボン系すり板導入による保守経費とCO<sub>2</sub>排出量の変化

これらの投入物質量及びCO<sub>2</sub>排出量をまとめたものを表10に示す。また、保守経費と比較したものを図6に示す。

図6 (a) は保守経費を示す。カーボン系すり板の導入前のトロリ線側とすり板側の保守にかかる合計の年間経費を100%とした場合、導入後のそれは70%強になっている。すり板材料の変更によって、すり板の経費が若干増加するが、それ以上にトロリ線の張替え減少による効果が大きかったことを意味する。このときのトロリ線、すり板等の投入量や張替え工事に使用した車両の燃料量等に基づいてCO<sub>2</sub>排出量を評価した結果が、図6 (b) である。経費とほぼ同様の傾向でCO<sub>2</sub>排出量が減少していることが分かる。全体に占めるトロリ線側の比率が大きいため、トロリ線側の張替え量を大きく削減することにより、すり板側のCO<sub>2</sub>排出量が若干増大しても全体としては20%以上の削減が達成されていることがわかった。

5. 本論のまとめ

LCAを行うにあたり重要なのは、評価対象がどのようなライフサイクルになっているかを見極めることである。構造物のように使用期間が長いものに使われる材料は製造建設時の環境負荷が高く、消耗部材についてはメンテナンス時における交換による環境負荷に注目する必要がある。今回の評価では、これらの2種のケースについて事例評価を行った。

6. おわりに

地球温暖化対策は2008年の洞爺湖サミットでの主要議題の一つとなった世界的な重要課題であり、2050年には世界のCO<sub>2</sub>総排出量を半減する方向で進み始めている。鉄道を含む輸送分野でも半減以上の達成が求められていくと考えられ、今まで以上にきめ細かくかつ革新的な取り組みが必要となる。また、CO<sub>2</sub>以外の排出物質への関心もますます高まると考えられる。今後これらへの取り組みを進めていくためには、LCA等の評価手法を使いこなし、環境負荷削減の目標を明確化し、技術開発を進めていくことが求められると考えられる。

文 献

- 1) 相原直樹, LCAによる鉄道環境負荷量の評価, JREA, 2003
- 2) (独)産業技術総合研究所ライフサイクルアセスメント研究センター ホームページ
- 3) レアメタル備蓄データ集 (31 鉱種), 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構, 2008
- 4) 上原元樹, ジオポリマー法による環境負荷低減コンクリートの開発, 鉄道総研報告, Vol.22, No.4, pp.41-46, 2008
- 5) 河合研至, コンクリートの環境負荷, プレストレストコンクリート, Vol.47, No.6, 2005
- 6) 久保俊一, 土屋広志, 池内実治, 在来線用カーボン系パンタグラフすり板の摩耗特性, 鉄道総研報告, Vol.9, No.6, pp.7-12, 1995
- 7) 針山隆史・相澤修次, JR東日本におけるカーボン系すり板の開発経緯と今後の取り組み, 電気車の科学, Vol.45, No.6, pp.13-20, 1992
- 8) 松山晋作, パンタグラフすり板とトロリ線, 金属, Vol.70, No.2, pp.42-50, 2000