

土木研究所資料

建設工事における
他産業リサイクル材料
利用技術マニュアル

(追補版)

平成 26 年 10 月

独立行政法人 土木研究所
材料資源研究グループ (新材料)

Copyright © (2014) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

建設工事における他産業リサイクル材料 利用技術マニュアル（追補版）

独立行政法人土木研究所材料資源研究グループ（新材料）

上席研究員
主任研究員

西崎 到
新田弘之

要 旨

本資料は建設産業以外で発生する廃棄物、副産物を原料としたリサイクル材料を公共事業で使用するために 2006 年に土木研究所編著により発刊された技術マニュアルの追補版である。

キーワード：産業廃棄物、副産物、公共事業、建設事業、リサイクル、再利用、リサイクル材料、マニュアル、ライフサイクルコスト、ライフサイクルアセスメント

まえがき

土木事業から発生する副産物については、その縮減に努めると共に、その有効な利用について土木事業者が責任をもって取り組む必要があることは、異論はないものと思われる。一方、建設分野は他分野から見て比較的容易に要求性能を達成できる様に見える材料・資材を、大量に使用することから、他産業から発生する副産物（例えば焼却灰、下水汚泥、石炭灰、廃ガラスなど）についても、受け入れられるのではないかと期待されることが多い。国内の廃棄物は年間 42,660 万トン（一般廃棄物、産業廃棄物の合計、平成 23 年度）にのぼる。これらのうち大部分は再利用あるいは減量化（スラグ化など）されているが、それでも年間 2 千万トン近くが、最終処分場で処分されている。最終処分場の残容量には限界が迫っており、土木分野で受け入れが可能な副産物は積極的に受け入れ、土木事業の社会貢献の幅を広げていくことが必要と考えられる。

既に多くの他産業副産物が様々な種類の土木資材として、開発・検討されてきている。その種類や用途は様々であるとともに、それらの開発段階もまちまちである。他産業副産物の土木分野での再利用を促進させるためには、土木で利用可能な他産業副産物の種類や効果的な適用用途、土木材料としての性能や環境安全性などの評価方法等の情報を整理することが必要と考え、土木研究所ではそのための資料をマニュアルの形でまとめる取り組みを進めてきた。はじめてマニュアルの形でとりまとめたものは、「公共事業における試験施工のための他産業再生資材試験評価マニュアル案」（土木研究所資料第 3667 号、建設省土木研究所、平成 11 年 9 月）であり、その後、さらに土木研究所内外の研究・開発の成果を追加するとともに、より積極的な受け入れを意識したマニュアルとして、「他産業リサイクル材料利用技術マニュアル」（土木研究所資料第 3981 号、独立行政法人土木研究所、平成 17 年 9 月）をまとめ、さらにこのマニュアルを基礎に細部を更新して、「建設工事における他産業リサイクル材料利用技術マニュアル」（編著：独立行政法人土木研究所、2006 年 4 月、大成出版社）として発刊した。

「建設工事における他産業リサイクル材料利用技術マニュアル」に従えば、他産業副産物を安全に土木材料として利用できることとなるが、いくつかの点でさらなる改善の余地が指摘されていた。その主たるものは、環境負荷低減の観点およびライフサイクルコストの観点からの評価項目の追加の必要性である。「建設工事における他産業リサイクル材料利用技術マニュアル」に整理された他産業副産物の土木での利用は、確かに副産物の有効利用であり、最終処分場の延命化には役立つものと考えられるが、より広くまた長期的に考えた場合には、環境負荷低減やコストの縮減にも効果を持つことが望まれる。他産業副産物のリサイクル利用が、かえって環境負荷を増大させたり、全体を考えた場合でもコスト高につながったり、土木で受け入れることで用途廃止時には「建設副産物」となる時の再リサイクルに課題を持たないか、などの観点からの評価があれば、さらに安心して利用できよう。そこで、土木研究所ではこれらの観点についても評価項目として追加すべく、重点プロジェクト課題「他産業リサイクル材料の有効利用に関する研究」（平成 18～21 年度）による研究に取り組んだ。

本マニュアルは上記の研究の結果に基づいて作成されたものである。検討の結果、「建設工事における他産業リサイクル材料利用技術マニュアル」の基本的部分については修正は必要はないものの、新たな研究や調査の結果をマニュアルに盛り込むことが必要と考えられた。2006 年に発刊されたマニュアルの追補版として、ここに本マニュアルを公表するものである。本マニュアルで追補された部分は概ね下記の通りである。

(1) 他産業副産物の多くの利用技術は開発途上であり、開発速度が比較的速い。そこで、「建設工事における他産業リサイクル材料利用技術マニュアル」発刊後の情報を、新たな留意事項の追加などとして取り入

れた。特に、「今後の検討を待つ材料」については多くの追加記載を行った。

(2) 新たなリサイクル材の評価指標として、環境負荷低減やコストの縮減の効果の評価方法について記述した。付属資料の中にいくつかの副産物について、土木で活用する際の LCA (ライフサイクルアセスメント)、LCC (ライフサイクルコスト) の実施例を示し、他の副産物や用途における参考資料とすることとした。

上記のように、本マニュアルは追補版として、「建設工事における他産業リサイクル材料利用技術マニュアル」の記述を補うとともに、新たなリサイクル材料や評価手法に関する情報を追加したものである。「建設工事における他産業リサイクル材料利用技術マニュアル」とともに利用して頂きたい。なお、本マニュアルでは、一定の基準に基づいて記載する材料を決定したが、本マニュアルに記載されなかった材料、用途の可能性を否定するものではない。リサイクル材料のよりよい利用方法に関する研究は、継続して進められており、今後さらに優れたリサイクル材の建設用途が開発される可能性がある。このような新しいリサイクル材も適切に評価が行われれば建設工事において安全に利用可能と考えられる。その際に、本マニュアルにおける評価の考え方や記載されている類似材料の評価を参考にいただければ、利用がより円滑になるものと考えられる。本マニュアルが他産業リサイクル材料のより有効な利用の促進に役立てられれば幸いである。

目 次

*まえがき

*参考：「建設工事における他産業リサイクル材料利用技術マニュアル」（2006年）目次

0. 本マニュアルの見方	1
I. 「第1編 共通事項」に関する追補	3
4. 用語の定義・解説	5
II. 「第2編 利用技術マニュアル」に関する追補	11
3. 石炭灰	13
3.4.1 アスファルト舗装用フィラー（修正版）	
III. 第3編 試験施工マニュアルに関する追補	17
3. 石炭灰	19
3.3.4 盛土材（修正版）	
4. 廃ガラス	21
4.2.4 軽量骨材（修正版）	
5. 廃ゴム	23
5.1.1-2 多孔質弾性舗装（修正版）	
IV. 「第4編 今後の検討を待つ材料」に関する追補	27
5. ペットボトル（PET フレーク）	29
5.1 リサイクル材の概要	
5.2 建設資材としての利用方法	
6. 廃木材	34
6.1 リサイクル材の概要	
6.2 建設資材としての利用方法	
7. 製紙スラッジ焼却灰	44
7.1 リサイクル材の概要	
7.2 建設資材としての利用方法	
7.2.1 盛土材等土質材料	
7.2.2 路盤材	
8. 製鋼スラグ	53
8.1 リサイクル材の概要	
8.2 建設資材としての利用方法	
V. 「付属資料」に関する追補	63
5. 再生資材の道路利用に関するライフサイクル評価事例	65

参考：「建設工事における他産業リサイクル材料利用技術マニュアル」（2006年）目次

第1編 共通事項

1. 総説	1
1.1 目的	1
1.2 適用範囲	3
2. リサイクル材料の品質と適用	7
2.1 品質	7
2.2 環境安全性	7
3. 本マニュアルの構成	9
3.1 マニュアルの内容	9
3.2 マニュアルの記述方式	9
4. 用語の定義・解説	11

第2編 利用技術マニュアル

1. 一般廃棄物焼却灰	16
1.1 熔融固化処理	16
1.1.1 舗装の路盤材料	20
1.1.2 アスファルト舗装の表層および基層用骨材	29
1.1.3 現場打ちコンクリート用骨材	33
1.1.4 コンクリート工場製品用骨材	38
1.1.5 埋戻し材	42
1.2 焼成処理（セメント化処理）	44
1.2.1 現場打ちコンクリート	49
1.2.2 コンクリート工場製品	55
2. 下水汚泥	61
2.1 熔融固化処理	62
2.1.1 舗装の路盤材料	64
2.1.2 アスファルト舗装の表層および基層用骨材	66
2.1.3 現場打ちコンクリート用骨材	70
2.1.4 コンクリート工場製品用骨材	73
2.1.5 埋戻し材	75
3. 石炭灰	77
3.1 セメント混合固化	78
3.1.1 盛土・人工地盤材料	79
3.1.2 路盤材料	84
3.2 石灰混合固化	87
3.2.1 路盤材料	88
3.3 焼結・焼成処理	90
3.3.1 人工骨材	91
3.4 粉碎処理	95
3.4.1 アスファルト舗装用フィルター	95
4. 木くず	99
4.1 破碎処理	101
4.1.1 マルチング材・クッション材	102
4.1.2 歩行者用舗装	107
4.1.3 緑化基盤材	112
4.1.3-1 生チップ緑化基盤材	113
4.1.3-2 堆肥化緑化基盤材	120
5. 廃ガラス	126
5.1 破碎処理	127
5.1.1 舗装の路盤材料	129
5.2 粉碎焼成処理	132
5.2.1 タイル・ブロック	133
5.3 熔融・発泡	139
5.3.1 盛土材	143

第3編 試験施工マニュアル

1. 一般廃棄物焼却灰	151
1.1 焼結・焼成固化処理	151
1.1.1 舗装の路盤材料	153
2. 下水汚泥	155
2.1 焼結・焼成固化処理	155
2.1.1 タイル等の焼成製品	156
2.2 焼却灰石灰混合固化	160
2.2.1 土質改良材	160
2.2.2 路盤材料	160

3. 石炭灰	162
3.1 粉碎処理	162
3.1.1 アスファルト舗装用フィラー	162
3.2 水熱固化	164
3.2.1 アスファルト舗装	164
3.3 選別利用	167
3.3.1 コンクリート用混和材	168
3.3.2 路盤材料	172
3.3.3 路床材料	174
3.3.4 盛土材	175
3.3.5 中詰め材	176
3.3.6 裏込材	177
3.3.7 土質改良材	178
4. 廃ガラス	180
4.1 粉碎処理	180
4.1.1 アスファルト舗装の表層用骨材	180
4.1.2 樹脂系舗装の表層用骨材	184
4.1.3 インターロッキングブロック用骨材	185
4.2 溶融・発泡	186
4.2.1 緑化保水材	186
4.2.2 湧水処理材	189
4.2.3 地盤改良材	190
4.2.4 軽量骨材	191
5. 廃ゴム（廃タイヤ）	193
5.1 粉碎・再生処理	194
5.1.1 アスファルト舗装用骨材	194
5.1.1-1 凍結抑制舗装	194
5.1.1-2 多孔質弾性舗装	198
5.1.1-3 歩道用弾性舗装	200
5.1.1-4 歩道用弾性ブロック舗装	202
6. 古紙	204
6.1 粉碎熱圧処理	204
6.1.1 コンクリート型枠	205
7. 木くず	207
7.1 炭化	207
7.1.1 土壌改良材	207
7.1.2 護岸用土留材	207
7.2 木粉＋プラスチック	208
7.2.1 型枠材	208
7.2.2 土木用資材	208
第4編 今後の検討を待つ材料	
1. 石炭灰	210
1.1 溶融固化	210
2. 瓦・陶磁器くず	216
3. 貝殻	217
4. 廃プラスチック	218
4.1 粉碎・再生処理	219
4.1.1 アスファルト舗装用改質材	219
4.1.2 アスファルト舗装用骨材	220
4.1.3 プラスチック工場製品（擬木、杭等）	221
5. 未記述のリサイクル材料	224
付 属 資 料	
1. 土壌の汚染に係る環境基準について	225
別表	225
付表	227
2. 土壌汚染対策法施行規則（抄）	231
別表第二（第18条第1項関係）	231
別表第三（第18条第2項関係）	232
3. 土壌含有量調査に係る測定方法を定める件	233
別表	233
付表	233
4. 環境リスク評価基準値	236

0. 本マニュアルの見方

- 本マニュアルは、「建設工事における他産業リサイクル材料利用技術マニュアル」（大成出版社 2006 年 4 月発行）の追補版である。「建設工事における他産業リサイクル材料利用技術マニュアル」とともに利用していただきたい。
- 「建設工事における他産業リサイクル材料利用技術マニュアル」の修正・追補のあったのみを記述した。修正箇所は赤字で表記したが、項全てが追加された場合については黒字で記載した。
- 各編ごとにまとめて修正・追補の概要を記載し、それに続いて対象となる項の修正版を記載した。章番号などは「建設工事における他産業リサイクル材料利用技術マニュアル」の番号のままとした。

I. 「第 1 編 共通事項」に関する追補

「4. 用語の定義・解説」において紹介している図書について、最新の情報を追加した。

(1) 第1編 共通事項

・廃棄物

「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」（昭和45年12月25日法律第137号）で規定されており、占有者自らが利用し、または他人に有償売却できないため不要になった固形状または液状のものをいう。「産業廃棄物」と「一般廃棄物」に区分される。

・産業廃棄物

事業活動から生ずる廃棄物であって、法（「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」）および政令で指定されたものをいう。これに該当しないものは、一般廃棄物として取扱う。このうち、爆発性、毒性、感染性等人の健康または生活環境への影響から、特別の基準で取扱う必要がある廃棄物は、それぞれ特別管理産業廃棄物・特別管理一般廃棄物として区分されている。

・リサイクル材料

再生資源のうち再生資源化施設等で製造されて再生利用できる資材。

・グリーン購入法

循環型社会の形成のためには、再生品等の供給面の取組に加え、需要面からの取組が重要であるという観点から、循環型社会形成推進基本法の個別法の一つとして平成12年5月に制定された。

国等の公的機関が率先して環境物品等（環境負荷低減に資する製品・サービス）の調達をするとともに、環境物品等に関する適切な情報提供を促進することにより、需要の転換を図り、持続的発展が可能な社会の構築を推進しなければならないことを定めている。

・再生資源

一度使用される、あるいは使用されずに収集・廃棄された物品、または副産物のうち、有用であって原材料として利用できるもの、もしくは利用できる可能性のあるものをいう。

・新材

使用する資材のうちリサイクル材料以外の新しい原材料。

・副産物

土木建築工事・製品の製造等に伴い副次的に得られた物品。

・建設産業リサイクル材料

建設工事から発生する再生資源を原料とするリサイクル材料。

・他産業リサイクル材料

主として建設工事以外から発生する再生資源を原料とするリサイクル材料。

・繰返し再生利用性

公共事業の資材として利用したりサイクル材料が、利用後の解体等の建設工事に伴い、建設副産物として再び発生したものを建設産業リサイクル材料として繰り返し利用できること。

・環境安全性

開発行為による土・生物などの環境に及ぼす影響が、人の健康を保護し生活環境を保全するのに支障のない性質。

・土壌の汚染に係る環境基準

「環境基本法」(平成5年11月19日法律第91号)第16条第1項による土壌の汚染に係る環境上の条件につき、人の健康を保護し、および生活環境を保全するうえで維持することが望ましい基準として、土壌の溶出試験における25成分(ふっ素とほう素が平成13年に加わり、現在は27成分)の環境上の条件(溶出量基準)を定めている。

・土壌汚染対策法

有害物質の土壌汚染による健康影響懸念や対策確立への社会的要請が強まっている状況を踏まえ、国民の安全と安心の確保を図るため、土壌汚染の状況の把握、土壌汚染による人の健康被害の防止に関する措置等の土壌汚染対策を実施することを内容とする法律。平成14年5月22日に成立し、29日環境省より公布された。

・土壌汚染対策法施行規則

平成14年12月26日に公布された環境省令。第18条第1項および別表第2で土壌に含まれる特定有害物質26成分の溶出量の限界(溶出量基準)を、第18条第2項および別表第3で土壌に含まれる特定有害物質9成分の含有量の限界(含有量基準)を示している。

・溶出試験

固形物質中に含まれる有害成分を、純水中等の一定の条件で溶出させ、定量する試験。

(2) 第2編 利用技術マニュアル 第3編 試験施設マニュアル 第4編 参考資料

1) 焼却灰・下水汚泥

・下水汚泥焼却灰

下水汚泥を脱水し焼却して得られた灰。大別すると石灰系焼却灰と高分子系焼却灰がある。前者は焼却の前処理工程である脱水時に消石灰・塩化第二鉄等の凝集剤を添加したものである。後者は、脱水前に高分子系凝集剤を添加したものである。

・一般焼却灰

清掃工場等の焼却炉から排出される一般廃棄物の焼却灰。

2) 木くず・廃ガラス・古紙

・クリンカアッシュ

微粉炭燃焼ボイラの炉底に落下したものを採取した石炭灰。砂状に砕かれている。脱水槽等で脱水したあと、砂状のまま貯蔵される。

・フライアッシュ

微粉炭燃焼ボイラの燃焼ガスから集じん器で採取された微粒の石炭灰。

- ・木くず

建設工事・開墾・木材伐採と木製品製造・パルプ製造および輸入木材卸売などの際に生じ、廃棄される木材あるいは木材のくず。

- ・間伐材

間伐のために伐採される小径の木材。幹全体における径が 14～16 cm以上の太い部分は資材として柱と梁材に使われるが、それより細い上の部分は林地に放棄されている。本マニュアルでは廃棄される部分を木くずとしてとりあげている。

- ・ガラスカレット

ガラスびん等を分別して細かく砕き粒度選別したもの。

- ・古紙

一度使用された紙あるいは製紙メーカから出荷された後、再生利用する目的で回収された紙。未使用の紙でも不要となって印刷、製本工場等から回収されれば古紙に含まれる。

- ・バーク堆肥

樹皮に鶏糞や尿素などの窒素源を添加して発酵腐熟させたもの。樹皮（水分 40～50%）に、1 トンあたり 50 kg程度の鶏糞と硫酸あるいは尿素を 10～20 kg混ぜ、水分を 50～60%にしてコンポスト化している。

- ・マルチング材

土壌の保温、乾燥防止、防草、侵食防止などのために、バーク・わら・ビニールシートなどの各種資材で土壌表面を被覆する資材。

- ・リターナブルびん

一升びん・ビールびん・牛乳びんなど、繰返し使用されるガラスびん。生きびんともいう。

- ・ワンウェイびん

一度使っただけで使い捨てにされるガラスびん。

3) 溶融固化・焼結等

- ・溶融スラグ

再生資源を溶融炉で溶融した時の融液を冷却して得られる非金属物質。冷却方法により水砕スラグ・空冷スラグ等に分類される。

- ・水砕スラグ

流れている融液に水を散布することにより、急冷して得られるガラス質で細粒状のスラグ。

- ・空冷スラグ

融液をそのまま放冷することによって得られるスラグ。なお、放冷時の温度コントロールを行い、結晶化を高めた徐冷スラグもある。

- ・ガラス質スラグ

融液を急速に冷却すると、凝固点に達しても特に異常な体積変化を起こさずに冷却されて、過冷却液体となる。この過冷却液体がある温度（ガラス転移点）まで冷却され、結晶化しないまま硬化してガラス状態の固体になったスラグ。

・結晶化スラグ

融液をゆっくり冷却すると、融点で融液は固化し結晶体となる。理想的な結晶では原子はどこまでも規則的に配列している。結晶化スラグは、融液を温度制御しながら徐冷することにより得られるスラグ。

・残灰

ストーカ式焼却などにおいて火格子下に残った灰。

・焼結

粉体を融点以下あるいは一部液相を生じる温度に加熱した場合に、焼き締まってある程度の強度を持つ固体になる現象。

・焼成

原材料を成形したものを焼結させること。ここでは、焼結晶（一次製品）を原材料として、それに添加剤を加え成形し、炉で焼結させることをいう。

・飛灰

廃棄物等の焼却の際、排ガスとともに移動して集じん機等に捕集される細かい灰。

・焼結粉砕セメント

都市ごみ焼却灰や下水汚泥等を主原料としたセメント。焼却灰や下水汚泥等の都市型総合廃棄物と石灰石などの天然原料を用いて成分調整した調合原料を、回転窯等によって 1,300℃以上で焼成し、得られた半熔融状態の焼結物（クリンカー）に石こうなどを加えて、冷却粉砕して製造される。

・焼却残渣溶融方式

ごみの焼却処理によって排出される残渣（焼却灰、飛灰）を、燃料の燃焼熱や電気から得られた熱エネルギー等により、概ね 1,200℃以上の高熱条件下において無機物を溶融する方式。

・ガス化溶融方式

ごみを熱分解し、発生ガスを燃焼するとともに、灰・不燃物等を溶融する機能を有する溶融方式。熱分解と溶融を一体で行う方式と分離して行う方式がある。

4) 道 路

・舗装の構造に関する技術基準・同解説

道路構造令改正に伴い、環境不可の少ない舗装の導入および舗装構造の性能規定化を図るべく、舗装の構造の基準に関する省令が制定された。この省令を具体化した舗装の構造に関する技術基準が国土交通省より通知され、この基準の解説書として、日本道路協会がとりまとめたものである。

・舗装設計施工指針（平成 18 年版）

新たに制定された舗装技術基準に定められる内容を適切かつ効率的に実施するため、舗装関係者の理解と判断を支援する実務的なガイドラインとして、日本道路協会の舗装委員会が発刊したもの。

・舗装施工便覧（平成 18 年版）

舗装の適切な施工を行うための技術書として、文献・資料等を日本道路協会がとりまとめたもの。

・舗装再生便覧（平成 22 年版）

舗装の計画、設計、施工の技術のうち、舗装での再生利用に関する技術について、日本道路協会が

とりまとめたもの。

・舗装設計便覧

舗装の設計に関する事項について、日本道路協会がとりまとめたもの。

・インターロッキングブロック

インターロッキングブロック舗装用のブロックで、高振動加圧即時脱型方式によって製造されるコンクリート製ブロック。このブロックは、路盤上にクッション砂を置いて敷設し、目地に砂を充填して施工される。隣り合うブロックのかみ合いによって荷重を分散する機能を有しており、かみ合い効果を得るために、側面に波形を設けたものが一般的であるが、側面に波形のないストレートタイプのものもある。

・改質剤

重交通道路でアスファルト舗装に大きなわだち掘れを発生させないために、舗装に使用されるアスファルト混合物に添加する材料。改質剤には、ゴム、熱可塑性エラストマーなどがあり、改質剤が添加されたアスファルトを**ポリマー改質アスファルト**という。

・下層路盤

舗装の路盤が2種類以上の層で構成されるときの下部の層。

・上層路盤

舗装の路盤が2種類以上の層で構成されるときの上部の層。上層路盤はアスファルト舗装の表層・基層あるいはコンクリート舗装版の直下であり、作用する応力も下層路盤に比べて大きい。

・締固め度

路床・路盤から基層・表層各層の施工に際し、そこで使用される材料を締め固める程度を表す度合い。通常、基準密度に対する百分率で表す。

・修正 CBR

路盤に用いる砕石と砂利、砂など粒状材料の強度を表す指標。JIS A 1211 に示す方法に準じて3層に分けて各層92回の突固めで得られる。最大乾燥密度に対する所要の締固め度に相当する**CBR**で表す。締固め度は3層92回突固め時の乾燥密度の95%とする。

・等値換算係数

アスファルト舗装を構成する各層に適用される材料および工法ごとに、層厚1cmが強度的に表層基層用加熱アスファルト混合物の厚さ何cmに相当するかを示す値。

5) コンクリート・地盤

・エポキシ樹脂塗装鉄筋

静電粉体塗装法を用いてエポキシ樹脂塗装を施した鉄筋。

6) その他

・表乾密度

表面乾燥飽水状態の骨材質量を骨材の絶対容積で除した値。

・吸水率

吸水飽和した骨材中の水の質量と固体部分の質量の比。一般に百分率で表す。

・再生ゴム

加硫ゴムを物理的または化学的に処理して再び粘着性と可塑性とを与え、原料ゴムや未加硫ゴム生地と同様の目的に利用できるようにしたもの。

(参考文献)

- 1) 建設省都市局：都市緑化における下水汚泥の施用指針、平成7年9月

Ⅱ. 「第2編 利用技術マニュアル」に関する追補

3. 石炭灰

「3.4 粉砕処理」における「アスファルト舗装用フィラー」において、(4)課題に関する情報を追加した。

3.4.1 アスファルト舗装用フィラー

(1) 適用範囲

本項は粉砕クリンカアッシュをアスファルト舗装用フィラーに使用する場合に適用する。

【解 説】

本項は粉砕クリンカアッシュを JIS フライアッシュの代わりに使用する場合に適用する。

(2) 試験評価方法

1) 品質基準と試験方法

粉砕クリンカアッシュをアスファルト舗装用フィラーに適用する場合の品質基準は、「舗装設計施工指針（平成 18 年版）」・「舗装施工便覧（平成 18 年版）」の品質規格を準用する。

2) 環境安全性基準と試験方法

粉砕処理したフライアッシュをアスファルトフィラーに使用する場合の環境安全性基準と試験方法は第 2 編 1.1.1(2)2)に準ずる。

【解 説】

1)について 品質基準に定められた各品質項目の試験方法は、「舗装調査・試験法便覧」に示される方法とする。粉砕クリンカアッシュをアスファルト舗装用フィラーに適用する場合は、JIS A 6201「コンクリート用フライアッシュ」の規格および表 3.4.1-1 および表 3.4.1-2 に示す「舗装設計施工指針（平成 18 年版）」・「舗装施工便覧（平成 18 年版）」の品質規格に適合することを確認して用いる。

表 3.4.1-1 粒度：石灰岩を粉砕した石粉の粒度規格

ふるい目開き	通過質量百分率（％）
600 μ m	100
150 μ m	90～100
75 μ m	70～100

表 3.4.1-2 物理的性質：フライアッシュ、石灰岩、石粉をフィラーとする場合

項 目	評価基準値
塑性指数（PI）	4 以下
フロー試験（％）	50 以下
吸水膨張率（％）	4 以下
剥離試験（％）	合格

2)について 第2編 1.1.1(2)2)の解説 (P. 29) に準ずる。

(3) 利用技術

1) 設計

粉砕クリンカアッシュを使用するアスファルト混合物の配合設計は、「舗装設計施工指針（平成 18 年版）」に示される方法と手順に準ずる。

2) 施工

粉砕クリンカアッシュを使用するアスファルト混合物の配合と混合の方法は「舗装施工便覧（平成 18 年版）」に準ずる。

3) 記録および繰返し利用性

粉砕クリンカアッシュを使用するアスファルト混合物を用いた場合、発注者は材料調書・施工図面・配合設計書等の工事記録を保存し、そのアスファルトが繰返し再生利用と処分に際して利用できるように備える。

【解 説】

3)について 配合設計上の留意点は、石炭灰の密度が小さいので密度補正を行うことである。

(4) 課題

1) 品質基準と試験方法

通常使用する石粉などとは性能が異なることに配慮しなければならない。また、アスファルト量の共通範囲が狭くなる傾向があるため、プラント出荷時の品質管理に留意する。

2) 供給性

使用に際して、工事に必要な材料の量および貯蔵方法に配慮しなければならない。

【解 説】

1)について 石炭灰は石粉と比べて粒子形状が球形で、粒径が小さい。したがって、マーシャル安定度試験においては、密度が大きい・空隙率が小さい・飽和度が大きい、という傾向が現れ、最適アスファルト量が、石粉を使用した場合に比べて少なくなる。このため、アスファルト混合物としての配合試験および混合物の性状試験（疲労抵抗性・流動抵抗性・摩耗抵抗性・剥離抵抗性等）の確認を行い、品質基準の検査を行う必要がある。また、アスファルト量の共通範囲が狭いため、アスファルト量の変動が混合物の品質に及ぼす影響が大きく、プラント出荷時の品質管理に留意する必要がある。

アスファルト舗装用フィラーの適用実績を、表 3.4.1-3 に示す。

表 3.4.1-3 アスファルトフィラーへの適用実績例

発生場所	下開 国内炭灰	竹原 国内炭灰	竹原 国内炭灰	新宇部 海外炭灰	磯子 国内炭灰	松島 海外炭灰
工種	私道新設	市道新設	私道新設	私道新設	町道新設	私道新設
施工年月	1982. 1	1982. 12	1982. 10～ 1983. 1	1983. 3	1984. 4～8	1985. 12
地域	広島	広島	広島	香川	福島	沖縄

2)について 施工上の留意点として、施工規模に見合う十分な量の石炭灰の確保と、品質を維持させる貯蔵方法の検討が必要である。

(参考文献)

- 1) 日本フライアッシュ協会：石炭灰とその利用について（主に道路材料として）、1987年4月
- 2) 日本フライアッシュ協会：石炭灰を道路舗装用材料として利用するための調査研究報告書、1989年4月
- 3) 日本フライアッシュ協会：石炭灰とその利用について（主に道路材料として）、1987年4月
- 4) (社) 土木学会：石炭灰の土木材料としての利用技術の現状と将来展望-埋立・盛土・地盤改良、1990年4月
- 5) BVK 社技術資料：A Granulate with many possibilities (steag)
- 6) Puch K-H、Vom Berg W:Nebenprodukte aus kohlebefeuerten Kraftwerken、VGB-Kraftwerkstechnik、77、7、pp. 604-610、1997. 7
- 7) 加藤他：焼却石炭灰(フライアッシュ)の舗装混合物への利用、日本道路会議、27th、RONBUNNO.12114、2007

Ⅲ. 「第3編 試験施工マニュアル」に関する追補

3. 石炭灰

「3.4 選別利用」における「3.3.4 盛土材」において、(4)課題に関する情報を追加した。

4. 廃ガラス

「4.2 溶融・発泡」における「4.2.4 軽量骨材」において、(2)利用例に関する情報を追加した。

5. 廃ゴム（廃タイヤ）

「5.1 粉砕・再生処理」における「5.1.1-2 多孔質弾性舗装」において、(1)適用範囲および(3)利用技術に関する情報を追加した。

3.3.4 盛土材

(1) 適用範囲

本項は、分級などの処理を施していない原粉を盛土材に使用する場合に適用する。

(2) 試験評価方法

盛土構造物は、その使用目的により機能も様々である。盛土に使用する無処理の石炭灰は、盛土構造物の各指針・基準における盛土材に要求されるものと同等の性能を有することを原則とする。

表 3.3.4-1 に盛土の種類と機能を示す。

表 3.3.4-1 盛土の種類と機能

種 類	主な役割	所要条件	一般的な法面勾配
道路盛土	交通荷重の支持	① 十分な支持力	1:1.5~1:2.0
鉄道盛土		② 沈下量、不同沈下が少ないこと	
造成地盛土	建物、施設の荷重	③ のり面の安定	1:1.8~1:2.0

盛土の品質基準は、次の仕様書・指針・基準などを参照するものとする。

- ・国土交通省：「土木工事共通仕様書」
- ・農林水産省：「土地改良事業計画設計基準」
- ・日本道路公団：設計要領 第二集、「土木工事共通仕様書」
- ・都市基盤整備公団：「工事共通仕様書」
- ・日本道路協会：「[道路土工要綱](#)」
- ・日本道路協会：「[道路土工 切土工・斜面安定工指針](#)」

各用途別の要求品質は、第2編 3.1.1(2)1) (P.83) およびその解説 (P.84) に準ずる。

リサイクル材料を盛土に使用する際に最も注意しなければならないことは、地盤としての環境安全性である。したがって、その材料である石炭灰を対象に、環境安全性に関する試験を行い、基準を満足することを確認する必要がある。環境安全性が基準を満足できなければ、無処理での盛土への採用はできない。環境安全性の評価は第2編 3.1.1(2)2) (P.83) およびその解説 (P.85) に準ずる。

(3) 利用技術

無処理の石炭灰を盛土に使用する場合についての設計基準は、特に定められていないので、発注者の指定する指針・基準等に準ずる。また、締固めの品質管理・施工管理・施工機械の選定にかかわる項目は、発注者の定める仕様に従い、予め試験工事等を実施し施工が出来ることを確認する。

盛土の材料に望まれる要件は、その用途（道路・鉄道・宅地等）および構成部分（上部路体・下部路体等）により異なるが、基本的には、崩壊に対する安定性の確保・圧縮性・自重と上載荷重に対する支持力の確保である。これらは盛土の強度に関わってくる。盛土の強度確保のためには、造成時の締固めなどが重要な要因となる。石炭灰を適切な含水比で加湿し転圧締固めを行えば、盛土材として十分な強度が発現する。

(4) 課題

盛土に使用する石炭灰の強度発現は、締固め密度によって大きく変化する。十分に締め固めた場合は、N値が10～50の強度が得られている。転圧せずに盛り立てた低い密度の石炭灰地盤では、強度発現がほとんど期待できず、法面崩壊などの事故を起こすような事態を生じる可能性がある**ので注意する**。また、現場で加水しながら含水調整した方が締固め密度が確保しやすいが、石炭灰の飛散に**十分気をつける必要がある**。

(参考文献)

- 1) (社)土質工学会：盛土の調査・設計から施工まで、1990年7月
- 2) (一財)土木研究センター：建設発生土利用技術マニュアル（第4版）、2013年11月
- 3) (社)地盤工学会：廃棄物と建設発生土の地盤工学的有効利用、1998年9月
- 4) 佐藤ほか：石炭灰の試験盛土施工、土木学会年次学術講演会講演概要集（CD-ROM）、Vol.57th、III-044、2002年9月

4.2.4 軽量骨材

(1) 課題

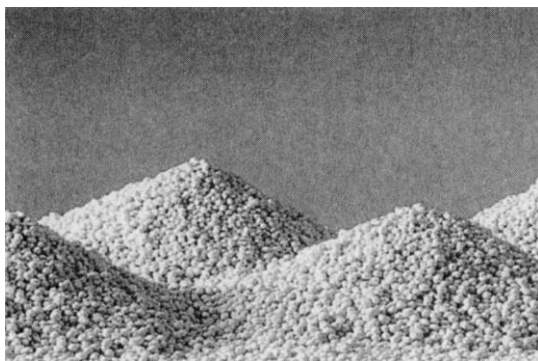
第3編 4.2.1(1) (P.193) に準ずる。

(2) 利用例

発泡廃ガラスのうち、独立間隙構造を有する非吸水性のものは、軽量で断熱性能に優れ、強度が大きい。この特性を利用して、コンクリート二次製品の軽量骨材に使用して、防音材・保温材を製造した事例がある。

発泡廃ガラス骨材は、アルカリ骨材反応に対する防止対策を行って、コンクリート二次製品に使用すれば、製品の軽量化を図ることもできる。発泡廃ガラス骨材を用いたポーラスコンクリート製品として雨水浸透枡、雨水浸透トレンチなども検討され、従来製品の2分の1程度まで軽量化が可能となっている。

また、軽量コンクリートだけでなく、軽量アスファルト用骨材としての適用も可能である。



軽量骨材



軽量骨材を利用した透水床板

図 4.2.4-1 発泡廃ガラスの軽量骨材⁵⁾

表 4.2.4-1 発泡廃ガラス軽量骨材の性能⁵⁾

品名	粒度 (mm)	単位容積質量 (kg/L)	点荷重強度 (N)	吸水率 24h (%)	熱伝導率 (kcal/mh°C)
1号	1.2 アンダー	0.38~0.48	9.8~19.6	10 以下	0.086
2号	1.2~2.5	0.29~0.42	29.4~49	10 以下	
3号	2.5~5.0	0.26~0.38	29.4~68.6	10 以下	
3M	5.0 アンダー	0.36~0.47	9.8~68.6	10 以下	

表 4.2.4-2 発泡廃ガラス軽量骨材の化学組成²⁾ (mass%)

Ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
1.3	68.2	6.3	0.6	0.6	9.5	11.7	1.3	0

(利用例)

- 1) 大阪学院大学 2 号館新築工事 (軽量骨材、スーパーソル)

(参考文献)

- 1) 財団法人クリーン・ジャパン・センター編：廃棄物リサイクル技術情報一覧 (産業廃棄物編改訂版)、pp.231～232、2001 年 3 月
- 2) 山本達：超軽量・高強度・低吸水性廃ガラス骨材の開発、クリーンジャパン 139 号、pp.26～28、2001 年
- 3) 原 裕・鬼塚克忠・横尾磨美・安田功：ガラス廃棄物の再資源化—建設分野への利用—、第 10 回廃棄物学会研究発表会講演論文集、pp.445～447、1999 年
- 4) 横尾磨美・原 裕・石川達夫：発泡廃ガラス材を用いた軽量コンクリートの基礎的研究、土木学会、シンポジウム「コンクリートと資源の有効利用」、pp.Ⅱ-85～92、1998 年
- 5) 財団法人建設物価調査会：建設用リサイクル資材ハンドブック、2000 年 12 月
- 6) 本田悟：廃ガラスを用いた発泡軽量骨材のコンクリートへの利用技術の開発研究、コンクリートテクニク、Vol. 28、No. 6、pp. 91～95、2009 年 6 月

5.2.1-2 多孔質弾性舗装

(1) 適用範囲

粒状、またはファイバー状のゴムチップをウレタン樹脂で舗装面に接着して多孔質弾性舗装とする場合に適用する。多孔質弾性舗装体は、**材料を現場で混練りし専用の施工機械で施工するものと、工場で加圧成型してブロック状のものとして製造されたものがある。**

ウレタン樹脂で接合した多孔質な舗装材料は、騒音低減効果を主目的とした弾性舗装に適用される。また、この舗装の混合物の空隙率は35%以上程度あり、透水機能も有する。

多孔質弾性舗装は、実大規模の試験施工試験において排水性舗装に比べて騒音低減率が著しく改善されるという結果が得られている。**一方、すべり抵抗性が損なわれる場合もあったが、これを改善した配合も開発されている。**

(2) 試験評価方法

1) 品質基準と試験方法

ゴムチップは使用済みタイヤを切断あるいは粉砕して、繊維・ワイヤー類等の混入物を除去し、分級工程を経て粒状、またはファイバー状にしたものとする。

ゴムチップには、直径1~2mmのファイバー状のものが使用されている。廃ゴムタイヤのゴムチップは、JIS K 6316「ゴム粉」に規定されているが、ファイバー状のものはJISになっていない。また、これらの製品を用いた舗装の品質基準は技術が一般化されていないため公的な技術基準はなく、発注者が用途に応じて仕様を定めて採用している。

2) 環境安全性基準と試験方法

廃ゴムタイヤのゴムチップの環境安全性基準と試験方法および安全性の管理は、第2編3.1.1(2)2(P.83)に準ずる。高分子有機材料系のリサイクル材料は、現時点では環境保全上の基準はないので、26成分の溶出試験と9種類の含有量試験を行う。

3) 骨材等

アスファルト混合物に用いられる骨材等の他の材料は、通常の方法の試験方法に準じて品質確認試験を行う。これらの品質確認試験は、必要に応じて「**舗装調査・試験法便覧**」によって行うものとする。

(3) 利用技術

1) 材料

材料は、現場施工タイプでは個々の材料を現場で混練りして使用するのに対し、ブロックタイプでは**予め工場で成型したブロックを使用する。**

①現場施工タイプ・・・ゴムチップ、硬質骨材、ポリウレタン樹脂、着色剤。

②ブロックタイプ・・・ゴムチップまたはファイバー状のゴムとウレタン樹脂を工場で加圧成型してブロック状のもの。ブロックの大きさは、幅1m×1m、厚さ2~5cmに成型されている例がある。

2) 設計

多孔質弾性舗装層には交通荷重に対する支持力があまり期待できないため、試験施工においては等

値換算係数 $a=0$ として見なして設計されることが多い。したがって、多孔質弾性舗装層の下層までで必要等値換算厚 T_A を満足するように設計するとよい。

3) 施工

①現場施工タイプ・・・材料を現場で混練りし、専用の施工機械で連続的に敷設する。

②ブロックタイプ・・・成型されたゴムブロック状の舗装材料を、エポキシ系接着剤などで舗装路面に貼付ける。

(4) 課題

① 環境安全性

ゴム（廃タイヤ）再利用の場合の環境基準は現在定められていない。したがって第2編4.2.1(2)2 (P.106) に準じて環境安全性を確認してから使用する。

② 物理化学的特性

ゴム粉の規格は、JIS K 6316「ゴム粉」および日本ゴム協会標準規格 SRIS 0002「ゴム粉」に規定されているが、ファイバー状のものには規格が定められていない。JIS K 6316「ゴム粉」および日本ゴム協会標準規格 SRIS 0002「ゴム粉」の規格は、タイヤの種類と粉砕方法によって区分されており、これらを適用することで品質は確保できる。なお、ファイバー状のものは品質基準がないので、ゴム粉に準じて品質を確認してから使用する。

③ 利用実績

道路の騒音低減舗装として最近試験施工が行われている。「他産業リサイクル材料の試験施工の実績について」のアンケート調査では、騒音低減対策として試験施工を実施していることが報告されている。

④ 供給性

ゴム粉は、年間10万トン程度リサイクルされており、供給性には特に問題がない。廃タイヤリサイクルは、全体で100万トン程度はあるが、舗装への利用に占める割合は小さく、今後需要が増したとしても問題にならない。

⑤ 繰返し利用性

結合材としてウレタン樹脂等の硬化性樹脂を使用したものは、再リサイクルする場合の結合材とゴムの分離が難しく、再リサイクルは困難になる。

⑥ 経済性

リサイクル材料を利用することによって新規に製造するよりはコスト削減になる。ゴム粉自体は新規に製造するよりはコスト削減になるが、これを舗装に添加した場合、ゴム粉が舗装に対して相対的に高価なので、通常の舗装と比べてコスト増になる。

⑦ 必要性

廃タイヤリサイクルは、全体で100万トン程度はある。舗装以外でのリサイクル用途が多いが、用途拡大として、舗装など建設分野への有効利用が注目されている。

⑧ 二酸化炭素発生量

ゴム粉を製造する際に電力を消費するので、多少二酸化炭素を発生するが、新たに製造するよりは

はるかに抑制効果が得られる。

(参考文献)

- 1) 明嵐、久保：多孔質弾性舗装の耐久性と騒音低減量—基礎的測定による特性把握、土木学会第 49 回年次学術講演会、V-70、pp. 140-141、1994 年
- 2) Seishi Meiarashi : “Porous Elastic Road Surface as Urban Highway Noise Measure”、Transportation Research Record、Journal of Transportation Board、No.1880、Energy and Environmental Concerns、pp.151-157、2004
- 3) Toshiaki Fujiwara, Seishi Meiarashi, Yoshiharu Namikawa and Masaki Hasebe : “Reduction of equivalent continuous A-weighted sound pressure levels by porous elastic road surfaces”、Applied Acoustics、Vol.66、pp.766-778、July 2005
- 4) 国生、藤田：すべり抵抗を改善した現場施工型多孔質弾性舗装、第 27 回日本道路会議、RombunNo. 12P65、2007 年

IV. 「第4編 今後の検討を待つ材料」に関する追補

今後の検討を待つ材料に関して、「5. ペットボトル (PET フレーク)」「6. 廃木材」「7. 製紙スラッジ焼却灰」「8. 製鋼スラグ」を新たに追加した。なお、従来の「5. 未記載のリサイクル材料」は「9. 未記載のリサイクル材料」に変更する。

ペットボトル (PET フレーク)

5.1 概要

5.1.1 廃棄物の概要

ペットボトルの原料は、ポリエチレンテレフタレート (PET) で樹脂の一種である。PET 樹脂の用途は、繊維、シート、ボトル、フィルム等であり、近年は清涼飲料用ボトルの需要が急激に伸びたことで、大きな割合を占めている。PET 樹脂は、比重約 1.32~1.34、耐熱荷重たわみ温度 120℃、融点は 264℃と高く、また曲げ強さも大きいため透明性、成形性、外観、寿命に優れた樹脂である。

使用済み PET ボトルは、ラベル・キャップ・ベースキャップ・本体等それぞれ使用している樹脂が異なるため、再利用するためには、その選別・洗浄技術や類似した容器で異なった樹脂製のものを分離する技術開発が求められる。

PET ボトルのリサイクルは、1997 年に施行された「容器包装リサイクル法」のもとに進められており、ごみの減量化と資源の有効利用を図る循環型社会の構築に向けた全国的な取り組みへと発展し、PET ボトルの回収率は下記のとおり増加傾向にある。

- ・ 2005 年度使用済み PET ボトル回収量：市町村 252 千トン、事業系 75 千トン

(回収率 66.1%)

- ・ 2012 年度使用済み PET ボトル回収量：市町村 299 千トン、事業系 228 千トン

(回収率 90.4%)

(PET ボトルリサイクル推進協議会：年次報告書・2013 年度版)

5.1.2 リサイクル材の概要

PET ボトルのリサイクルには、マテリアルリサイクルとケミカルリサイクルがあるが、これまでは処理コストだけでなく、消費エネルギーを比較的安く抑えられるマテリアルリサイクルを中心に、繊維・シート・ボトル (食品を除く)・成形品等に再商品化されてきた。

また、2001 年 5 月の法改正により、新たに化学分解法によるリサイクルも認められた。この化学分解法は、PET ボトルを化学的に分解して原料物質に戻し、再び PET 樹脂を作る手法であり、様々な飲料ボトルとして利用されている。

分別収集された PET ボトルは、再商品化施設で異物除去した後、洗浄及び乾燥されてフレーク及びペレットとなり資源として再生される。再生 PET フレークの製造工程を図 5.1-1 に示す。

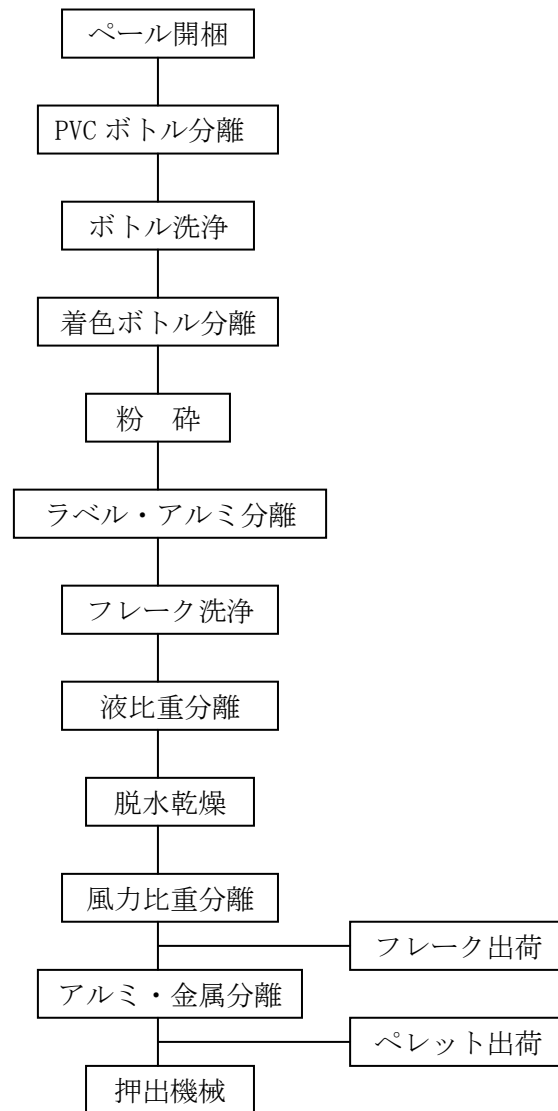


図 5.1-1 PET ボトルの代表的な再生処理プロセス例

PET ボトル再生資材の土木・建設分野では、遮水シート保護マットとしての利用、軽量性の特性を生かして気泡混合土へ添加し補強効果を期待した利用、使い捨てガラスビンとの混合によるタイル製品への利用の他、PET ボトルを再利用したコンクリート型枠等としても利用され始めている。

PET フレークは、Φ8mm 程度の小片に粉砕されたもので、切断面は鋭利になっており薄片状をしている。表-5.1-1 に PET ボトルの再商品化された製品の主要な品質基準を示す。また、PET フレークの粒度分布の例を図 5.1-2 に示す。

表 5.1-1 PET ボトルの再商品化された製品の主要な品質基準

規格項目	基準値
比重	1.350～1.390
カットサイズ	8 mm Φ スクリーン
水分率	0.6%以下
異物混合率	1300ppm 以下

((財) 日本規格協会：再生ポリエチレンテレフタレート成形材料試験方法 TR K 0001)

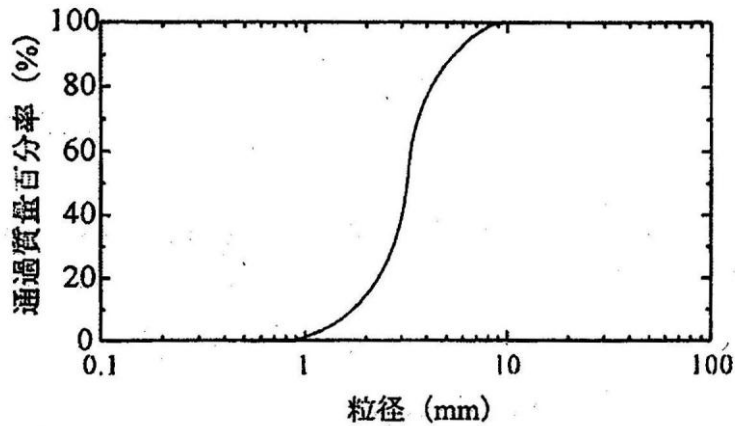


図 5.1-2 PET フレークの粒径加積曲線の例

PET ボトルを構成している元素は、炭素・酸素・水素の3成分であり、完全に燃焼させれば炭酸ガスと水になり有害なガスは発生しない。しかし、使用済み PET ボトルを塩化ビニルなどの他のプラスチックが混入しないように分別回収することが困難であり、高温溶融による処理の場合には有害ガス発生に関する安全性の確認が必要である。一方、常温でフレーク状に破碎して製造する PET フレークを使用する場合には、環境に対して安全であると考えられる。

5.2 建設資材としての利用方法

(1) 適用範囲

本項は、PET ボトルをフレーク状に再生処理した PET フレークを、気泡混合土に利用する場合に適用する。

気泡混合土工法は、混合する気泡の量やセメント添加量により、使用目的に応じた軽量性、流動性、強度を有する地盤材料を製造できる。PET ボトルは軽量性に優れた材料であり、気泡混合土に PET フレークを添加することにより、その軽量性を損なうことなく補強材としての効果を期待するものである。

PET フレークを使用した気泡混合土の施工実績はほとんどないため、今後試験施工等により実績を重ねることにより品質性能等を確認することが必要である。

(2) 試験評価方法

気泡混合土は、一般の土と比較して軽量であり流動性がよいことから、山岳地や軟弱地盤での盛土、土木構造物における橋台・擁壁の裏込めや構造物の埋戻し、空洞充填材等広範囲に適用可能である。PET フレークを、それら構造物の土木資材として適用する場合には、使用目的に応じた各指針・基準等の要求されるものと同等の性能を有することを確認しなければならない。

PET フレークを使用した気泡混合土の品質評価としては、下記のように流動性（充填性）、施工性（ポンプ圧送の可能性）、及び施工後の強度を検討している例がある。

- ・流動性及び施工性に関しては、P/C（セメント重量に対する PET フレーク重量）と供試体の空気量（Va）、湿潤密度（ δt ）、フロー値との関係から評価。
- ・施工後の強度については、P/C を変化させて、一軸圧縮強度及び変形係数との関係から、軽量性や施工性を損なわない範囲での配合を検討。

なお、気泡混合土の品質基準については、次の指針・マニュアル等を参照するものとする。

- ・（独）土木研究所：「混合補強土の技術開発に関する共同研究報告書—気泡混合土利用技術マニュアル」、共同研究報告書、第 170 号、1997 年
- ・NEXCO（旧日本道路公団）：「気泡混合軽量土を用いた軽量盛土工法の設計・施工指針」、1996 年

(3) 利用技術

気泡混合土の設計は、適用用途によって細部では異なる部分があるが、通常は、気泡混合土の強度・密度、あるいは流動性の設定が必要である。それらの設計基準は、発注者の指定する指針・基準等に準じるものとする。

図 5.2-1 に気泡混合土の主な適用用途例を示す。

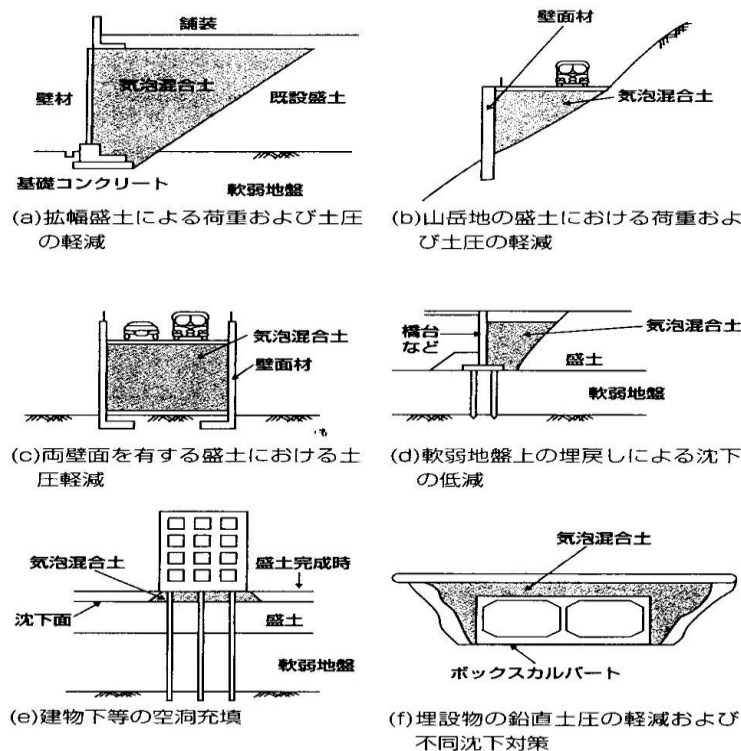


図 5.2-1 気泡混合土の主な適用

(4) 課題

①PET フレークを使用した気泡混合土の施工実績はほとんどないため、今後試験施工等により品質性能及び施工性等を確認することが必要である。

②気泡混合軽量土は、地盤材料として種々の用途に適用できるが、土木資材として大量の材料を使用する機会が多いため、PET フレークの供給量について事前の調査が必要である。

③ペットボトル自体は腐食しないが、PET フレークを使用した気泡混合軽量土はセメントを使用するため、繰り返し再利用については今後の課題である。

④PET フレークは、ペットボトルを常温でフレーク状に破砕して製造するため、環境に対しては安全であると考えられる。

(参考文献)

- 1) PET ボトルリサイクル推進協議会：PET ボトルリサイクル年次報告書（2013 年度版）
- 2) (財) 土木研究センター：発生土利用促進のための改良工法マニュアル、平成 9 年 12 月
- 3) 亀井、松尾：フレーク状の PET ボトルを利用した気泡混合軽量土の一軸圧縮特性、土木学会論文集、No.764、Ⅲ-67、pp. 359-366、2004. 6
- 4) 久保井他：ペットボトルと使い捨てガラスビンのタイル製品への有効利用、土木学会第 58 回年次学術講演会論文集、V-502、pp. 1003-1004、平成 15 年 9 月
- 5) 久保井他：PET ボトルと使い捨てガラスビンのリサイクルによるタイル作製、土木学会第 59 回年次学術講演会論文集、7-286、pp. 571-572、平成 16 年 9 月

廃木材

6.1 概要

6.1.1 廃棄物の概要

廃木材の種類は、山間部における建設工事による伐根と伐採材、建築解体現場から発生する建築廃材、街路剪定工事等から排出される枝葉、製鉄所から出る端材・樹皮、工場等の梱包資材や木質パレット等、その発生源や発生形態は様々である。その他に、森林の維持管理による間伐材、台風や豪雨等で発生する流木なども含まれる。

間伐材・剪定材・流木材あるいは伐採樹木等の自然環境の中から発生する廃木材は、重金属等を含まないため環境面では安全である。しかし、建築解体工事から排出される建築廃材には、防腐剤などの有害な化学成分を含んでいることがあり、利用に際しては環境安全性に十分留意する必要がある。また、壁材等の建築廃材には金属異物や接着剤、塗装用ペンキ等が付着しているなど種々の廃木材が発生するため、必ずしも経済的に再資源化できないものもある。

廃木材の発生量に関する公式な統計は未整備となっているが、林野庁の推計によると、平成17年度には、①建設工事に伴う「建設系発生木材」が約460万トン、②製材工場残材が約500万トン、③林地残材が370万トンと推定され、膨大な発生量とみられている。

建設工事に伴って発生する建設発生木材については、「平成24年度建設副産物実態調査結果」によれば、建設廃棄物に占める建設発生木材の割合は、全体の約7%にあたる約500万トンで、再資源化率は約89%となっている。(表6.1-1参照)

表 6.1-1 建設廃棄物の排出状況(平成24年度建設副産物実態調査結果より)

建設廃棄物	場外排出量(万トン)			
	小計	再資源化量	縮減量	最終処分量
アスファルト・コンクリート塊	2,577	2,404	0	13
コンクリート塊	3,092	3,072	0	20
建設発生木材	500	446	26	28
建設汚泥	657	452	107	98
建設混合廃棄物	280	160	2	117
その他(金属くず・廃プラ等)	164	138	12	14
建設廃棄物全体 計	7,269	6,832	147	290

注) 四捨五入の関係上、合計値と合わない場合がある。

本文では、建築解体工事で発生する建築解体材は対象外とし、自然由来の廃木材について、チップ化した木質系材料を用いた歩行者用道路への利用技術についてとりまとめた。

6.1.2 リサイクル材の概要

木質廃材をリサイクルする最も一般的な方法は、チップ状に粉砕して再利用する方法である。間伐材、伐採材、剪定枝葉等の発生木材をチップ化した木質系材料を用いた舗装は、現状では試験施工などにより歩行者系道路に適用されている。

チップ化は、図 6.1-1 に示すように大別して、「切削」、「破碎」、「粉砕」の工程に分類される。現場でのチップ化の一般的な方法は、まず目的に応じて発生木材を品目別に分別し、異物を除去してからチップ化した後、スクリーンを通してふるい分けによりサイズ毎のチップとなる。

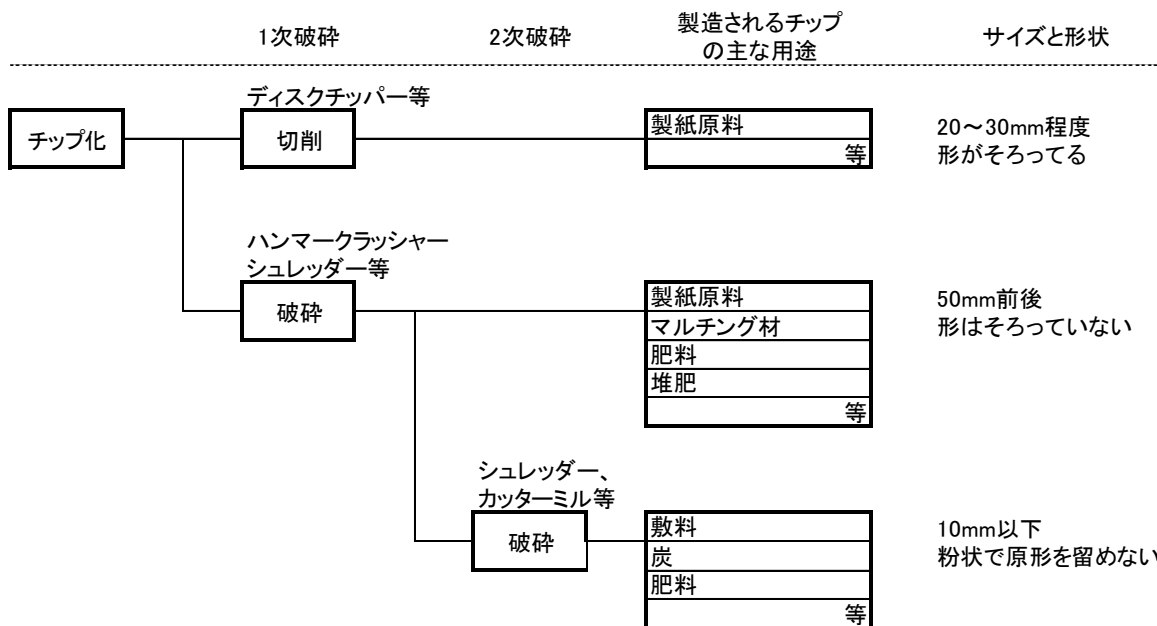


図 6.1-1 チップ化の種類と使用機械

製造されるチップの形状、寸法及び一般的な用途を表 6.1-2 に示す。

表 6.1-2 スクリーンサイズ別のチップの寸法と用途

スクリーンサイズ (mm)	チップサイズ (mm) 長さ×幅×厚さ	一般的な用途
20	20×3×3	家畜敷料、吹付け基材用堆肥
25	25×4×4	家畜敷料、吹付け基材用堆肥
38	38×6×6	堆肥
50	50×8×8	堆肥
65	65×10×10	マルチング
100	100×12×12	マルチング、のり面緑化基盤材、燃料

注 1) 上記チップサイズ及び生産量は、粉砕前材料の乾燥度合いにより変化する。

注 2) 用途は、利用者により多少代わる場合がある。

伐採樹木や間伐材、剪定材、流木等を原料とするチップ材は、自然環境の中にあり、重金属等の有害物質を含まないため環境面では安全な副産物である。しかし、建築物等の解体材は、耐久性を維持

するため防腐剤等の有害な薬剤（例えば、クロム・銅・砒素防腐剤（CCA））を注入していることがあり、このような材料と判断できない廃木材をチップ化して利用する場合には、「土壌の汚染に係わる環境基準」等による環境安全性に関する確認を行う必要がある。

6.2 建設資材としての利用方法

(1) 適用範囲

チップ化した木質系材料を表層材として、歩行者用道路に利用する場合に適用する

【解説】

チップ化した木質系材料を用いた舗装は、現状では園路等の歩行者道路や歩道に利用されている。この舗装は、環境負荷が少なく、景観に調和した舗装の築造が可能である。

主な使用材料は、チップ化した木質系材料とバインダーであるが、要求性能（弾力性、耐久性等）の調節に粗目砂を配合する場合もある。バインダーとしては、特殊エポキシ樹脂、湿気硬化型ポリウレタン樹脂、改良アスファルト乳剤等が用いられている。

(2) 試験評価方法

1) 品質基準と試験方法

チップ化した木質系材料を用いた混合物が、歩行者用舗装材としての品質性状を確認するための評価項目には、①園路・歩道舗装としての基本機能（歩行性・耐久性）、②経済性であること（経済性）、③景観との調和に優れたものであること（色彩性）、等がある。

試験方法は、JIS（日本工業規格）、舗装調査・試験法便覧等に基づき行うものとする。

2) 環境安全性と試験方法

自然由来の廃木材以外に有害物を含むと思われる木くずを使用する場合は、使用するチップ材について環境安全性の確認を行うものとする。

①安全性基準

有害物質の溶出量は、「土壌の汚染に係わる環境基準について」（平成3年8月23日環境庁告示第46号）別表（付属資料1．別表参照）に示される27項目のうち銅を除いた26項目（「土壌汚染対策法施行規則」（平成14年12月26日環境省令第29号）第18条1項及び別表第2で定められた項目と同じ）の溶出限界（以下、溶出量基準と記す）を満足しなければならない。

有害物質の含有量は、「土壌汚染対策法施行規則」第18条第2項及び別表第3（付属資料2．別表第3参照）に示される9項目の含有限界（以下、含有量基準と記す）を満足しなければならない。

②試験方法

溶出試験方法は、「土壌の汚染に係わる環境基準について」（平成3年8月23日環境庁告示

第46号)付表(付属資料1.付表参照)に示された方法による。

含有量試験方法は、「土壌含有量調査に係わる測定方法」(平成15年3月6日環境省告示第19号)付表(付属資料3.付表参照)に示された方法による。

③安全性の管理

木くずを使用する場合は、ロット単位で溶出試験を実施し、その結果を品質表示票として添付されたものを使用する。

【解説】

1)について チップ化した木質系材料を使用し、園路・歩道舗装としての基本機能を有する本工法の品質評価基準は、表6.2-1を標準とする。

表 6.2-1 品質評価基準(標準)

品質基準	評価項目	評価基準	評価方法
①園路・歩道舗装として基本機能を有すること	歩行性	<ul style="list-style-type: none"> ・滑り抵抗値が湿潤状態で40BPN^{注1)}以上であること ・歩行の支障になる水溜まりができてにくいこと 	<ul style="list-style-type: none"> ・振り子式スキッドレジスタンステストによるすべり抵抗試験方法 (舗装調査・試験法便覧) ・舗装路面の弾力性試験方法 (舗装調査・試験法便覧) ・現場透水量試験方法 (舗装調査・試験法便覧)
	耐久性	交通荷重 ^{注2)} と気象条件により著しく破損しないこと	<ul style="list-style-type: none"> ・カンタプロ試験方法 (舗装調査・試験法便覧) ・コンクリートの凍結融解試験方法 (舗装調査・試験法便覧) ・耐候性試験 (JIS B 7754) ・カンタプロ試験方法(低温での実施) (舗装調査・試験法便覧)
②経済性であること	経済性	既存の景観を考慮した舗装工法に比較して施工費及び維持管理費が著しく高くないこと	<ul style="list-style-type: none"> ・施工単価 ・施工方法マニュアル ・補修方法マニュアル
③景観との調和にすぐれたものであること	色彩性	色彩の調整ができること	<ul style="list-style-type: none"> ・供試体 ・施工写真 ・配合表、等

注1) BPN: British Pendulum Number

注2) 「舗装設計便覧」における「歩道および自転車道等の舗装」の荷重に耐え得る強度であること。

表 6.2-1 に示す品質性能の評価の他に、下記の方法により評価している例がある。

- 配合割合の決定……マーシャル安定度試験（舗装施工便覧（平成 18 年版））
- 舗装体の弾力性……弾力性測定装置（JIS A 6519「体育館床の弾力性測定装置」）による鉛直方向の衝撃変位量
- 安定性……プロクターニードル試験（地盤工学会「地盤調査法」）
- 骨材はく離飛散抵抗性……ラベリング試験方法（往復チェーン）による摩耗量（舗装調査・試験法便覧）

なお、施工時の歩行者系道路舗装材の現場における品質評価として、表 6.2-2 のような品質管理試験を行うものとする。

表 6.2-2 木質系チップ舗装の品質管理試験

試験名称	試験方法	目標値
振り子式スキッドレジスタンステストによるすべり抵抗試験方法	舗装調査・試験法便覧	BPN40 以上
現場透水量試験方法	舗装調査・試験法便覧	透水係数 1×10^{-2} cm/s
舗装路面の弾力性試験方法	舗装調査・試験法便覧	アスファルト弾性混合物と同程度

2) について 環境安全性の評価は、「土壌の汚染に係わる環境基準について」及び「土壌汚染対策法施行規則」の評価基準値をまとめた表 6.2-3 に示す「環境リスク評価基準値」を満足するものとする。試験によって得られた溶出量・含有量は、この評価基準値を満足しなければならない。

表 6.2-3 環境リスク評価基準値

項 目	溶出量基準	含有量基準
カドミウム及びその化合物	0.01mg/L 以下	150mg/kg 以下
六価クロム化合物	0.05mg/L 以下	250mg/kg 以下
シマジン	0.003mg/L 以下	
シアン化合物	検出されないこと	50mg/kg 以下 (遊離シアン)
チオベンカルブ	0.02mg/L 以下	
四塩化炭素	0.002mg/L 以下	
1,2-ジクロロエタン	0.004mg/L 以下	
1,1-ジクロロエチレン	0.02mg/L 以下	
シス-1,2-ジクロロエチレン	0.04mg/L 以下	
1,3-ジクロロプロペン	0.002mg/L 以下	
ジクロロメタン	0.02mg/L 以下	
水銀及びその化合物	0.0005mg/L 以下	15mg/kg 以下
セレン及びその化合物	0.01mg/L 以下	150mg/kg 以下
テトラクロロエチレン	0.01mg/L 以下	
チウラム	0.006mg/L 以下	
1,1,1-トリクロロエタン	1mg/L 以下	
1,1,2-トリクロロエタン	0.006mg/L 以下	
トリクロロエチレン	0.03mg/L 以下	
鉛及びその化合物	0.01mg/L 以下	150mg/kg 以下
砒素及びその化合物	0.01mg/L 以下	150mg/kg 以下
ふっ素及びその化合物	0.8mg/L 以下	4,000mg/kg 以下
ベンゼン	0.01mg/L 以下	
ほう素及びその化合物	1mg/L 以下	4,000mg/kg 以下
ポリ塩化ビフェニル(PCB)	検出されないこと	
有機リン化合物	検出されないこと	
アルキル水銀	検出されないこと	

安全性の管理については、製造者が木材チップを出荷する場合には表 6.2-4 のような品質表示票に所定の事項を記載し、添付して品質を保証するものとする。

表 6.2-4 安全性の品質表示に関する記載事項(例)

番 号	記 載 事 項
①	銘柄および材料の種類
②	製造者名
③	製造工場名
④	製造年月または出荷年月日
⑤	ロット番号
⑥	数量
⑦	品質保証表示（カドミウム 0.01mg/L 以下、鉛 0.01mg/L 以下などの表- にある項目の品質保証を表示する）
⑧	その他（粒度・物理性状・溶出試験結果など）

(3) 利用技術

1) 使用材料

木質系チップ舗装混合物に使用する材料は、設計書に特記した場合を除き、規格に適合したものや同等以上の品質を有するものとする。

2) 設計

木質系舗装の路盤工は、「舗装設計施工指針（平成 18 年版）」に準ずるものとする。木質系チップ舗装混合物の配合は、バインダーの種類や舗装工法により違いがあるが、(2)1)の品質基準を満足する配合によるものとする。

3) 施工方法

木質系チップ舗装の施工は、混合・敷き均し・転圧・養生等について適正な品質管理のもとに行うものとする。

【解 説】

1) について 木質系チップ舗装の表層混合物の主な使用材料は、木質系チップ、バインダー、砂等である。木質系チップは 2.0～3.0cm のものが多いが、さらに粉碎して 1.0cm 以下のウッドファイバーとして使用した事例もある。バインダーは、特殊エポキシ樹脂、湿気硬化型ポリウレタン樹脂、改良アスファルト乳剤等が使われている。

2) について 木質系チップを用いた舗装混合物による表層工は、工法やバインダーの種類により配合に違いがあるので、配合表を確認し設計図書に明記する必要がある。

バインダーとしてエポキシ樹脂を使用した配合の例を、表 6.2-5 に示す。

表 6.2-5 配合設計

材 料 名	配合 (質量比 %)	配合 (容積比 %)
木質チップ	32	85.1
特殊エポキシ樹脂 (主剤)	10	3.5
特殊エポキシ樹脂 (硬化剤)	10	4.2
粗目砂	48	7.2

図 6.2-1 に、舗装構造の断面例を示す。

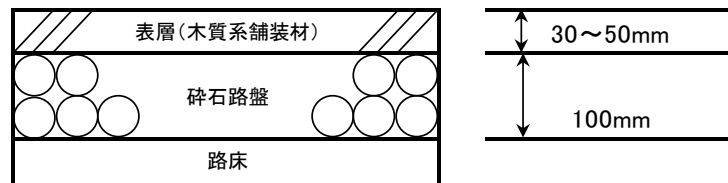


図 6.2-1 舗装構造の断面例

3) について 木質系チップ舗装の一般的な施工手順を、図 6.2-2 に示す。

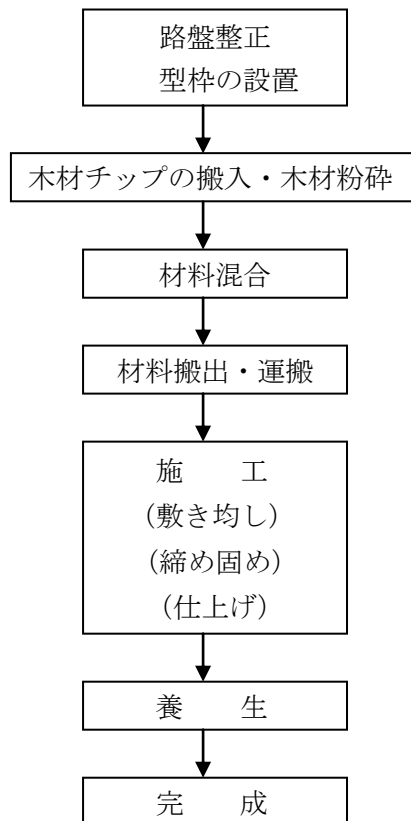


図 6.2-2 木質系チップ舗装の一般的な施工手順例

工種の内容と留意点を、以下に示す。

① 準備工

路盤整正は、舗装の厚さが確保できるようにローラ・プレート等で平坦に仕上げる。型枠の設置は、高さ・線形に留意して行う。

② 木材チップの粉碎と搬入

木材チップは、間伐材や伐採材等を原料収集地点で粉碎するか、木材チップ工場で粉碎し、現場まで搬入する。運び込まれた木材チップと粗目砂などの他の材料は、雨などの影響を受けないようにシートなどで覆う。

③ 材料混合

所定の配合割合で計量したものを容器に入れ、外観・量等をチェックする。材料の混合は、モルタルミキサで行う。最初に、木材チップをモルタルミキサに入れ、攪拌しながらあらかじめ混合しておいた結合材を加え、さらに約1分間攪拌する。混合作業は、特殊エポキシ樹脂等を取り扱うため、材料が体に触れないように長袖の作業着・マスク・ゴム手袋・前掛け等を着用する。

④ 材料搬出・運搬

混合が終わった材料は、均一に混合されていることを確認し、モルタルミキサから搬出する。運搬は、車両の進入が可能な場合は軽トラックで、不可能な場合には一輪車等で行う。

⑤ 施工

運搬された材料を、均一にレーキ及び木ゴテで敷き均す。敷き均し終了後、養生板等を敷き、その上からプレートで締め固め均一な路面を確保する。その後、タンパと木ゴテなどで目地違いや端部の処理を行う。

⑥ 養生

雨などに備えて舗装面全体を養生シートで覆い、端部をアンカーで固定する。養生期間は、夏季で12時間程度、冬季で24時間程度とする。

(4) 課題

1) 物理化学特性

歩道舗装としての機能を確認する物理試験や、環境安全性を確認するための溶出試験及び含有量試験等をどの程度の頻度で実施したらよいかは、今後の課題である。

2) 利用実績

木質系チップ舗装の使用例は増え始めているが、全国的には広がっていない。

3) 供給性

野焼きの禁止により、農林業などにおける伐採材の処理に困っている状況であり、使用にあたって材料の入手が困難なことはない。

【解説】

1)について 園路、歩道舗装としての基本機能（歩行性、耐久性）について、表 6.2-1 に示す確認試験を実施し、すべり抵抗・弾力性・透水性・耐候性等が、「舗装調査・試験法便覧」に示される適用基準を満足していることを確認する。すなわち、物理性能の要求品質はすべて新材の場合と同等とする。

リサイクル材料特有の物理性能に対する要求事項の有無に関する調査は、今後の課題である。

2) について 木質系チップ舗装の実績はそれほど多くはないが、全国的には種々の発注機関で試験的に採用され、使用例が増え始めている。今後は、自治体を中心に多くなると予想される。

3) について 野焼きの禁止により、農林業などにおける伐採材の処理に困っている状況がある。建設業も同様であり、使用にあたって材料の入手が不可能な地域はないと考えられる。ただし、木質廃材は全国ほぼすべての地域で発生するものの、発生する廃木材の種類や発生形態も様々であり、当該地域のリサイクル処理能力も異なるため、利用するには調達に関しての配慮が必要である。

その他、留意すべき点は以下のとおりである。

① 環境安全性

伐採材あるいは抜根に農薬などの化学物質が付着していない場合は、環境安全性に関する問題はないが、そのことは試験により確認されていることが大切である。試験結果が安定すれば、試験頻度は少なくしてよい。

② 繰返し再利用性

供用とともに廃木材が腐食し土化していくため、繰返し再利用については考慮しなくてもよい。

③ 経済性

既存の景観を考慮した他の舗装工法などに比べて、施工費用は少し高くなる。今後の検討課題である。

④ 必要性

今後、野焼きの禁止により伐採材の処理量は増えるが、用途は限られている。建設事業においても利用法を検討し、準備しておく必要がある。

(参考文献)

- 1) みずほ総合研究所：木質リサイクルの課題と循環型利用拡大の可能性、みずほレポート、2005.9
- 2) (独) 土木研究所：建設発生木材リサイクルの手引き（案）、2005.12
- 3) 田中他：木質アスファルト加熱機械及び配合割合の技術開発、第4回廃棄物対策研究発表会抄録集、平成16年度廃棄物対策研究推進事業、Ⅱ.87-90、2004
- 4) 小林：歩行者に配慮したウッドファイバー舗装、舗装、Vol.29、No.4、pp.25-28、1994
- 5) 小林、越川：感覚的嗜好を考慮した歩行者系道路舗装「ウッドファイバー舗装」に関する検討、道路建設、No.541、pp.70-76、1993.2
- 6) 荒井他：木質系材料を活用した歩道やグラウンド用の舗装混合物、第23回日本道路会議論文集、pp.142-143、平成11年10月

製紙スラッジ焼却灰

7.1 概要

7.1.1 廃棄物の概要

製紙スラッジ焼却灰（以下、PS 灰と呼ぶ）は、製紙工場から排出される製紙スラッジをボイラー等の焼却施設で燃焼させ、燃焼時の熱エネルギーを発電用蒸気として回収した後に残った燃え殻である。PS 灰は、一般の土と同等に扱うことが可能であるが、軽量であることが最大の特徴である。

PS 灰は基本的には同様の性状を有しているが、表 7.1-1 に示すように灰種（焼却前の製紙汚泥成分や焼却炉の型式による違い等）により物性値が異なる。また、粒子表面の形状が多孔質であることから吸水量に富み、液状化しやすい材料でもある。さらに、主成分の一つである酸化カルシウム（CaO）の影響によりアルカリ性を示し、自硬性を有している。

表 7.1-1 焼却炉の型式による PS 灰物性値の一例

		単 位	流動床灰	ストーカー炉灰
土粒子の密度		g / cm ³	2.449	2.365
粒 度	礫分	%	24.10	4.11
	砂分	%	48.87	32.33
	シルト分	%	8.91	41.57
	粘土分	%	18.11	21.99
液性限界		%	NP	92.2
塑性限界		%	NP	NP
塑性指数		%	NP	NP
pH		—	11.4	12.0

PS 灰は、紙パルプ製造過程で製紙工場より排出されるものであり、そのため地域によって発生量が異なる。中国地域及び四国地域の紙パルプ製造企業を対象とした PS 灰の月間の発生量及び利用状況の調査例を、図 7.1-1、表 7.1-2 に示す。

それによると、PS 灰の月間排出量は 1,000 トンを上回る工場が 9 工場（大手紙パルプメーカー中心）占めている。また、利用用途については、セメント原料としての利用が 6 割を超え、次いで製鉄保温剤（約 24%）、土壌改良材（約 8%）となっている。一方、埋め立て処分量は月間 1,644 トンで、PS 灰総排出量の 1 割程度となっている。

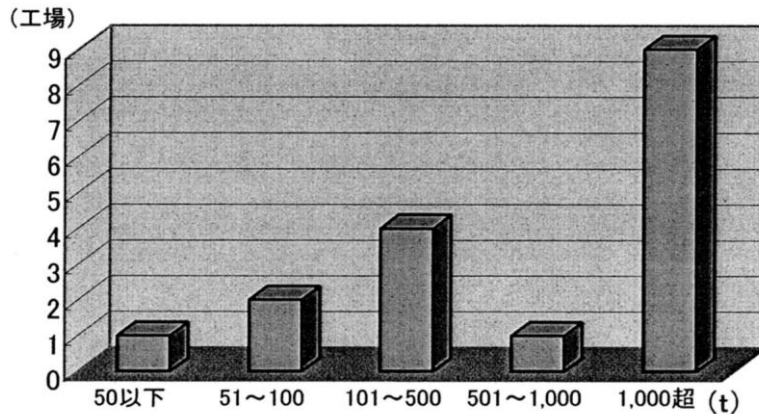


図 7.1-1 PS 灰の排出量(月間・平成 19 年度)

表 7.1-2 自社 PS 灰の利用状況(月間)

利用状況	利 用 量	
	(トン)	(%)
セメント原料	7,994	62.0
埋め立て	1,644	12.8
その他	3,252	25.2
計	12,890	100

注) 「その他」は、「土壌改良材」、「製鉄保温材」、「路盤材」

7.1.2 リサイクル材の概要

(1) 物理・化学的性質

PS 灰と採石粘土の物理・化学的特性の例を表 7.1-3 に示す。PS 灰の主成分は、二酸化珪素 (SiO_2)、酸化アルミニウム (Al_2O_3)、酸化カルシウム (CaO)、酸化マグネシウム (MgO) であり、一般の土に近い化学組成で構成されている。利用する古紙の種類や焼却炉の型式にもよるが、土や石炭灰と比べ、PS 灰は SiO_2 が少なく、 Al_2O_3 、 CaO 、 MgO を多く含んでおり、ポズラン反応を活性化させる物質（石灰、アルミナ、酸化鉄など）の含有比率が高く、これが土質改良効果の要因になっている。

また、粒子密度は、 $2.2\sim 2.73 \text{ g/cm}^3$ 、単位体積質量は $0.35\sim 0.82 \text{ g/cm}^3$ 程度であり、焼却施設が異なると灰の色や性状も大きく異なる。

表 7.1-3 PS 灰と採石粘土の物性例

灰種	粒度分布 (%)				組成 (%)					
	粗砂	細砂	シルト	粘土	強熱減量	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₂
A	20	34	37	9	0.9	33.9	0.7	7.7	3.7	53.2
B	6	21	70	3	1.7	24.6	0.6	26.6	4.7	41.9
C	37	32	21	10	0.6	28.2	1	26.1	3.9	40.3
D	37	8	24	31	8.4	25.8	0.7	7.9	5.9	51.3
E	19	9	67	5	22	26.1	0.7	18.7	3	29.6
F	8	2	55	35	1.7	33.6	1.1	15.2	3.4	45.1
G	0	5	54	41	4.5	46.6	2.2	2.4	5.2	39.1
H	13	32	38	17	0.3	33.2	4.4	9.5	3	49.5
I	17	4	10	69	3.1	30	3.5	9	2.9	51.4
粘土	0	0	7	93	5	9.1	6.9	0.6	1.3	77.2

ペーパースラッジと PS 灰の例を、写真 7.1-1 に示す。

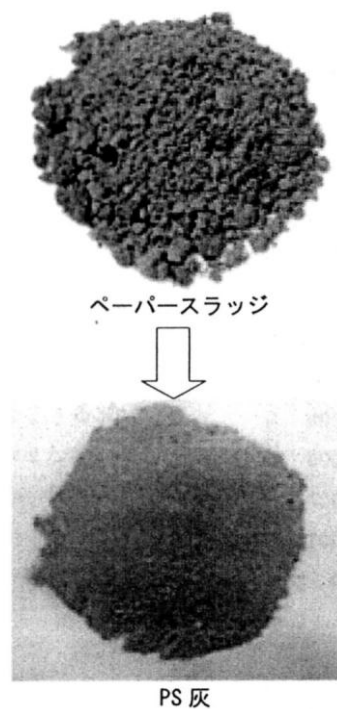


写真 7.1-1 ペーパースラッジと PS 灰

(2) 利用用途

PS 灰の利用用途について、研究開発途上のものを含めると図 7.1-2 のとおりである。

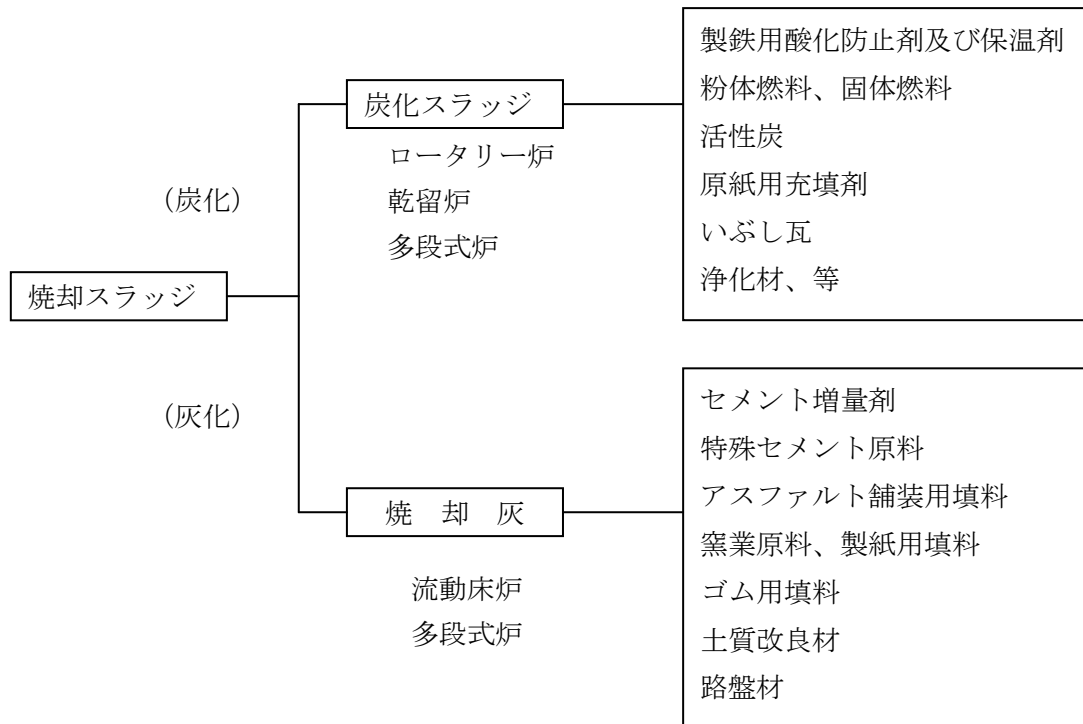


図 7.1-2 有効利用用途の一例

PS 灰は土木資材として、i) 吸水率が高く、自硬性の特徴を生かした軟弱土の土質改良材、ii) 固化処理による路盤材や盛土材、iii) 熔融固化によるアスファルト混合物やコンクリート骨材への利用が可能である。それら用途へ利用するための処理方法の例を、表 7.1-4 に示す。

表 7.1-4 主な土木資材の用途別処理方法の概要

用途	処理方法
土質改良材	PS 灰を高温（約 1,000℃）で再燃焼させて製造した材料やさらに高分子を組み合わせさせて改良固化剤として利用。
路盤材や盛土材	PS 灰にセメントや石灰、石膏と水を加え化学反応させた後、混合・攪拌することにより造粒化させる処理方法で、比較的成本が安価で砂の代替え材や盛土材・路盤材として利用。
アスファルト混合物やコンクリート骨材等への利用	PS 灰を 1,200℃～1,300℃で熔融し、再結晶させることにより骨材として利用するもの。熔融固化による処理は、研究開発途上にあり、品質は向上するが製造コストが高い。

(3) 安全性

PS 灰を盛土材・路盤材に適用検討した例によると、PS 灰単体の溶出水について、土壌の汚染に係わる環境基準（環境庁告示第 46 号）に基づく溶出試験を行った結果は、表 7.1-5 に示すように概ね基準を満足しているが、フッ素の溶出量が基準値を超えている。このため、加水とセメント処理により造粒し、フッ素等有害物質の溶出を抑制する方法が行われている。

したがって、PS 灰をリサイクルする場合には、PS 灰及びセメントあるいは石灰等で固化処理した材料について、土壌の汚染に係わる環境基準に基づき、溶出水の土壌環境基準を確認するとともに、

周辺地盤に対する環境安全性には十分注意しなければならない。

表 7.1-5 PS 灰及び造粒化 PS 灰からの土壤環境基準項目の溶出量

		PS 灰	造粒化 PS 灰		
含水比 (%)		0	36	39	43
セメント添加率 (%)		0	2	5	10
基準値 (mg/ L 未満)					
フッ素	0.8	5.2	0.4	< 0.01	< 0.01
ホウ素	1.0	0.22	0.16	0.1	< 0.01
セレン	0.01	0.005	< 0.001	< 0.001	< 0.001
六価クロム	0.05	0.008	0.011	0.02	0.024

7.2 建設資材としての利用方法

7.2.1 盛土材等土質材料

(1) 適用範囲

本項は、PS 灰を盛土材等土質材料として使用する場合に適用する。

PS 灰は、単位体積質量が小さいため軽量材としての特徴を有しており、また細粒分の多い材料であるため軽量骨材、充填材等地盤改良材、のり面吹き付け材等への利用が有効である。通常、セメントや生石灰等の固化材や混和材を添加処理し、造粒したものが使用されている。

(2) 試験評価方法

1) 品質基準と試験方法

盛土材等の土質材料は、その使用目的により適用用途・機能も様々であり、使用に際しては、適用用途ごとの各指針・基準で要求されるものと同等の性能を有することを確認しなければならない。

盛土材等土質材料の品質基準及び試験方法は、以下のような仕様書・指針・基準等を参照するものとする。

- ・国土交通省：「土木工事共通仕様書」
- ・農林水産省：「土地改良事業計画設計基準」
- ・NEXCO（旧日本道路公団）：「設計要領 第二集」
- ・UR 都市機構（旧都市基盤整備公団）：「工事共通仕様書」
- ・（社）日本道路協会：「道路土工：道路土工要綱」
- ・（社）日本道路協会：「道路土工：切土工・斜面安定工指針」

2) 環境安全性基準と試験方法

リサイクル材料を盛土材等土質材料に使用する際に最も注意しなければならないことは、地盤に与える環境安全性である。これまでの例では、PS 灰単体の場合、概ね土壤環境基準を満足するがフッ素

が基準値を超えており、そのままの状態では使用することができない。このため第4編7.1(3)(P.251)で述べたように、加水やセメント・生石灰等の固化材を添加処理することにより、有害物質の溶出を抑制することが行われている。

したがって、PS 灰を使用する場合には安全性管理のために、「土壌の汚染に係わる環境基準について」(環境庁告示第46号)に基づき、ロット単位でPS 灰の溶出試験を実施するとともに、セメント・生石灰等の固化材処理による改良材(造粒材)についても、工事着手前・工事中及び竣工後に環境安全性の確認を行わなければならない。

環境安全性基準及び試験方法は、第4編6.2(2)2)(P.240)に準じる。

(3) 利用技術

PS 灰を盛土材等土質材料に使用する場合の設計基準は、使用用途により異なるため発注者の指定する仕様書・指針・基準等に準じるものとする。

PS 灰を土質材料として検討あるいは利用した主な例を、以下に示す。

① 盛土材

製紙工程で発生するペーパースラッジとバーク(樹皮)、助燃剤として石炭を燃焼させたPS 灰に、水とセメントを添加し造粒させた材料について盛土材への適用検討として、施工性に関する支持力についてコーン指数 q_c (500KN以上)、盛土の安定性に関する強度特性としては一軸圧縮強度 Q_u (7日養生後で150KN/m²以上)から所要の配合比を求めている。

② シールド導管充填材

PS 灰、採石粘土及び廃石灰を混合し粒度調整した材料(HB ソイル:ハイブリッドソイル)と水及びセメント添加により流動性を有するブラウト材について、シールドトンネルの空隙充填材(HB グラウト)及び埋め戻し材(HB サンド)として適用したものである。HB グラウト及びHB サンドの配合例を、表7.2.1-1に示す。

表 7.2.1-1 HB グラウトとHB サンドの配合例

資材名称	配 合 (kg/ m ³)					発泡率(%)
	採石粘土	PS 灰	BB セメント	生石灰	水	
発泡HB グラウト	150~160	140~160	140~150	—	395~420	31.7~43.8
高強度HB グラウト	365	365	220	—	650	—
HB サンド	1,070	270	33	40	420	—

注1) 発泡HB グラウト : 目標強度 $qu_{28}=0.5N/mm^2$ 、目標フロー値 230 ± 20 mm、目標比重 0.77 ± 0.05

注2) 高強度HB グラウト : 目標強度 $qu_{28}=1.0N/mm^2$ 、目標フロー値 160 mm程度、目標比重 1.55 ± 0.05

HB グラウトと HB サンドの使用に際しては、PS 灰の原料と製品段階で「土壌の汚染に係わる環境基準」、「ダイオキシン類対策特別措置法に定める環境項目」を、また工事着手前、及び竣工後に工事区間の上流側と下流側から地下水を採取し、「地下水の水質汚濁に関わる基準」、「ダイオキシン類特別措置法の水質に係わる項目」についての試験を実施し、環境安全性を確認している。

③ サンドコンパクションパイル (SCP) の中詰め材

PS 灰と山砂製造時の泥土を原料として、生石灰、セメント等の固化材・混和材を混合し造粒化した材料を2週間エージングした後、SCP の中詰め材に適用したものである。改良効果については、杭間と砂層部のN値及び振動による泥濘化で評価している。

(4) 課題

1) 環境安全性

PS 灰は、「土壌の汚染に係わる環境基準」に基づく溶出試験結果では概ね溶出量基準を満足するが、フッ素が基準値を超過するため、製造段階でのフッ素の溶出低減方法が課題である。なお、環境安全性の確認は「土壌の汚染に係わる環境基準」の他に、適用場所によっては、「地下水の水質汚濁に関わる基準」についても確認が必要である。

また、PS 灰は細粒分を多く含む材料であり、使用前及び使用時の周囲への飛散防止対策、あるいは雨水等による流出防止対策が必要である。

2) 供給性

PS 灰は、製紙工場より排出されるものであり、その点で発生地域が限定されるものと思われ、再利用にあたっては使用量との関係から調達の方法等を考慮しておくことが必要である。

また、PS 灰を土木資材として大量に使用する場合、品質管理の面から灰種ごとの成分の変動を確認する必要がある。

3) 繰り返し再利用性

繰り返し再利用性の可能性についての検討が必要である。

7.2.2 路盤材

(1) 適用範囲

本項は、PS 灰を道路舗装の路盤材料に使用する場合に適用する。

PS 灰は、フッ素の溶出量が土壌環境基準を超過するため、有害物質の溶出抑制方法として水とセメント・生石灰等の添加により造粒した材料を使用しており、これにクラッシュランを適量混合し路盤材として使用している。

(2) 試験評価方法

1) 品質基準と試験方法

PS 灰を用いた路盤材料の品質基準は、道路舗装の種類・使用位置及び工法・材料に応じて、「舗装設計施工指針（平成 18 年版）」、「舗装施工便覧（平成 18 年版）」等の該当する品質規定を準用する。また、PS 灰をアスファルトコンクリート再生骨材と混合し、所定の品質が得られるように調整した再生路盤材料は、「舗装再生便覧（平成 22 年度版）」に示される品質規定を準用する。

道路舗装用路盤材の品質基準の概要を、表 7.2.2-1～表 7.2.2-2 に示す。

表 7.2.2-1 下層路盤材料の品質規格

工法・材料	修正 CBR (%)	一軸圧縮強さ MPa	PI
粒状路盤材料、クラッシュランなど	20 以上	—	6 以下
セメント安定処理 ^{注2)}	—	材例 7 日、0.98	—
石灰安定処理 ^{注2)}	—	材例 10 日、0.7 ^{注1)}	—

注 1)セメントコンクリート舗装では 0.5

注 2)クラッシュランは所定の粒度が必要。また、セメント安定処理に用いる骨材は修正 CBR10% 以上かつ PI (塑性指数) がセメントで 9 以下、石灰で 6～18 が望ましい。

表 7.2.2-2 上層路盤材の品質規格

工法・材料	修正 CBR (%)	一軸圧縮強さ MPa	マーシャル安定度 kN	その他の品質
粒度調整碎石	80 以上	—	—	PI4 以下
加熱アスファルト安定処理	—	—	3.43 以上	フロー値 10～40 空隙率 3～12%
セメント安定処理	—	材令 7 日 2.9	—	—
石灰安定処理	—	材令 10 日 1.0	—	—

なお、上層路盤として用いる骨材は、すりへり減量が 50%以下とする。粒度調整碎石は、所定の粒度が必要である。また、安定処理に用いる骨材は、修正 CBR20%以上 (アスファルトを除く)、PI が 9 以下 (石灰では 6～18) かつ最大粒径が 40mm 以下であることが望ましい。

品質基準に定められた品質項目の試験方法は、「舗装調査・試験法便覧」に示される方法を準用する。

2) 環境安全性基準と試験方法

PS 灰の環境安全性基準と試験方法は、第 4 編 6.2(2)2) (P. 240) に準ずる。

(3) 利用技術

1) 設計

PS 灰を用いた路盤の設計は、「舗装の構造に関する技術基準・同解説」、「舗装設計施工指針 (平成 18 年版)」等に示される方法と手順に準ずるものとする。設計に際しては、PS 灰を用いた路盤材料の等値換算係数は、現状では施工実績も多くないため試験施工を行うことにより確認する。また、当面重交通道路への適用は避け、B 交通以下への適用により実績を積み重ね、供用性等のデータを収集するなどの配慮が必要である。

なお、PS 灰を用いた路盤材料については、凍上試験結果より凍上抑制材料として不合格なものも見られるため、寒冷地域へ適用する場合には注意が必要である。

2) 施工

PS 灰を用いた路盤の施工は、路盤工法に応じて「舗装設計施工指針（平成 18 年版）」、「舗装施工便覧（平成 18 年版）」等に示される方法と手順に準ずる。

3) 記録及び繰り返し利用性

PS 灰を路盤材に使用する場合、発注者は使用材料調書（PS 灰の品質表示票、PS 灰を用いた路盤材の環境安全性等）、平面図・断面図・数量等の設計図書を保存し、当該路盤材料の繰り返し再利用と処分に際して利用できるようにしておく。

(4) 課題

1) 環境安全性

第 4 編 7.2.1(4)1) (P. 50) に同じ。

2) 供給性

第 4 編 7.2.1(4)2) (P. 50) に同じ。

3) 繰り返し再利用

第 4 編 7.2.1(4)3) (P. 50) に同じ。

(参考文献)

- 1) 名越他：製紙スラッジの有効利用、愛媛県建設技術研究所報、2006. 7
- 2) 中国経済産業局：平成 19 年度 3R システム化可能性調査事業「製紙スラッジ焼却灰を利用した排水処理システムの構築」報告書、平成 20 年 3 月
- 3) 浅田他：PS 灰と採石粘土の混合地盤材料のトンネル充填材への活用事例、基礎工、vol. 32、No. 7、pp. 44-47、2004. 7
- 4) 城戸他：製紙工場から排出されるペーパースラッジ灰の土木材料としての特性、北海道開発局土木研究所月報、No.631、pp. 10-16、2005. 12
- 5) 浅田他：PS 灰を利用したリサイクル材のサンドコンパクションパイル工法への適用、土木学会第 62 回年次学術講演会論文集、3-401、平成 19 年 9 月

製鋼スラグ

8.1 概要

8.1.1 廃棄物の概要

鉄鋼スラグは、製鉄業から大量に発生する産業廃棄物である。鉄鋼スラグは、図 8.1-1 に示すように高炉スラグ、転炉スラグ、電気炉スラグの 3 種類があり、転炉スラグと電気炉スラグを合わせて製鋼スラグと呼ぶ。

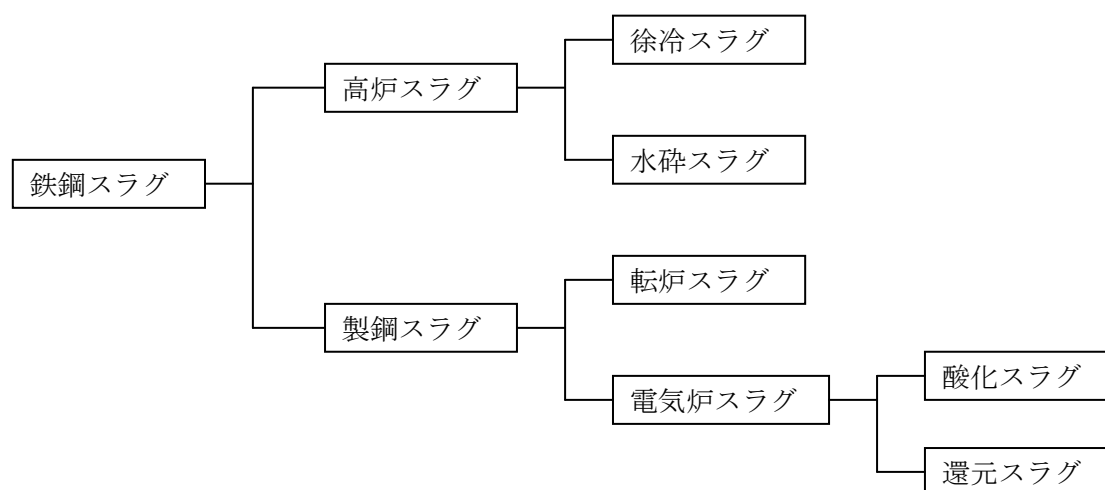


図 8.1-1 鉄鋼スラグの分類

製鋼スラグは、銑鉄、スクラップ等を精錬し、鋼を製造する際同時に生成するスラグであり、精錬所の種類により「転炉スラグ」と「電気炉スラグ」に大別される。また、この他に製鋼工程の予備処理を実施する場合があります、その際に生成する予備処理スラグ（脱磷スラグ、脱珪スラグ）がある。

① 転炉スラグ

転炉スラグは、転炉を用いた製鋼工程で発生する。高炉で生成された銑鉄は、C、Si、Mn、P 等の不純物を 4～5% 含むために硬くてもろい。そのため、靱性のある鋼を製造するために、生石灰などの副原料を混入して転炉内の熔融銑鉄に純酸素（99.5%以上）を吹き付けて、溶鉄に含まれる炭素等の不要成分を酸化燃焼させる。このとき、生成された酸化物は投入した副原料と結合してスラグを形成する。このスラグは、転炉スラグと呼ばれ、鉄との密度差により分離・回収され、粗鋼 1 トンに対して 100～150kg 程度生成される。

② 電気炉スラグ

電気炉においては、転炉と異なり主原料である鉄くずに外部から熱を加えて溶解し、精錬する。電気炉スラグの特徴は、炉内雰囲気を変化性、還元性に自由に変えることができることであり、それぞれの過程で発生するスラグを酸化スラグ、還元スラグという。

酸化スラグは、溶鋼を攪拌しながら酸素を吹き込み、鋼中の炭素と反応させて一酸化炭素の気泡を作り、その作用によって不要成分を酸化する酸化精錬時に生成するスラグをいう。また、還元スラグは、酸化精錬後、酸化スラグを排出し、新たに還元剤、石灰等を投入し、溶鋼中の酸素を除去する還元精錬時に生成するスラグをいう。酸化スラグの発生量は、粗鋼1トン当たり約70kg、還元スラグの発生量は同じく約50kgである。

製鋼スラグの発生量及び利用量を、表8.1-1に示す。平成25年度の粗鋼生産量は、前年度に比べて3.9%増の111,503千トンとなったが、製鋼スラグの生成量は2,777千トンと前年比4.6%の増加となっている。この内、転炉スラグは5.3%（584千トン）増加、電気炉スラグは1.9%（51千トン）の増加になっている。

また、平成25年度の外販量と所内使用量を合わせた利用量合計では15,556千トンであり、その内外販量について利用用途別にみると、道路用が最も多く43.3%、続いて土木用40.3%、地盤改良材用7.6%となっている。

表 8.1-1 平成 25 年度製鋼スラグ生産量及び利用量 (単位:千トン)

		H23 年度 数量	H24 年度 数量	平成 25 年度				
				数量	対前年度比増減		構成比 (%)	
					数量	%		
粗 鋼	転炉鋼	81,217	82,846	86,102	3,256	3.9	77.2	
	電気炉鋼	25,245	24,458	25,401	943	3.9	22.8	
	計	106,462	107,304	111,503	4,199	3.9	100.0	
生 成 量	転炉スラグ	11,347	11,036	11,620	584	5.3	80.7	
	電気炉スラグ	2,863	2,726	2,777	51	1.9	19.3	
	計	14,210	13,762	14,397	636	4.6	100.0	
利 用 量	外 販 量	再利用	4	24	0	▲24	▲100.0	0.0
		道路用	3,263	3,967	4,958	990	25.0	43.3
		地盤改良材	593	454	869	416	91.6	7.6
		土木用	3,992	3,907	4,614	707	18.1	40.6
		セメント用	635	545	565	21	3.8	4.9
		加工用原料	236	202	145	▲58	▲28.6	1.3
		その他	271	303	292	▲11	▲3.7	2.6
		計	8,995	9,403	11,444	2,041	21.7	100.0
	自社使用量	6,066	4,217	4,113	▲105	▲2.5	100.0	
	小計	15,061	13,620	15,556	1,936	14.2	—	
埋め立て等		331	201	141	▲60	29.8	—	
合計		15,392	13,821	15,697	1,876	13.6	—	

注) 道路用には鉄道用を含む。その他用は、再利用、肥料・土壌改良材・コンクリート用、建築用、その他利用の合計

注) 粗鋼生産量は、経済産業省「鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計月報」による

8.1.2 リサイクル材の概要

製鋼スラグには、鉄 (Fe) やマンガン (Mn) などの金属元素が酸化物として含まれ、また副原料の石灰の一部が未消化のまま遊離石灰として残るため、比重が大きく、水と接触した場合には膨張するなどの性質を示す。その性状は、製鉄所ごとの違いだけではなく、製鉄所内においても製錬工程の違いによって比重や膨張量などの品質に差異が見られる。

製鋼スラグは天然の碎石と類似しており、従来から一定期間エージング後に道路用路盤材、加熱アスファルト混合物用骨材に利用され、これらの製鋼スラグについては JIS 化 (JIS A 5015 道路用鉄鋼スラグ) されている。その他、土工用材料、地盤改良用材、セメントクリンカ原料、土壌改良材等に用いられている。

製鋼スラグは、ヤードまたはドライピットで徐冷されたものをブルドーザ等で掘り起こし、その後破碎、整粒工程にかけられ用途に応じた粒度に調整される。転炉スラグの破碎・ふるい分けの工程例を、図 8.1-2 に示す。

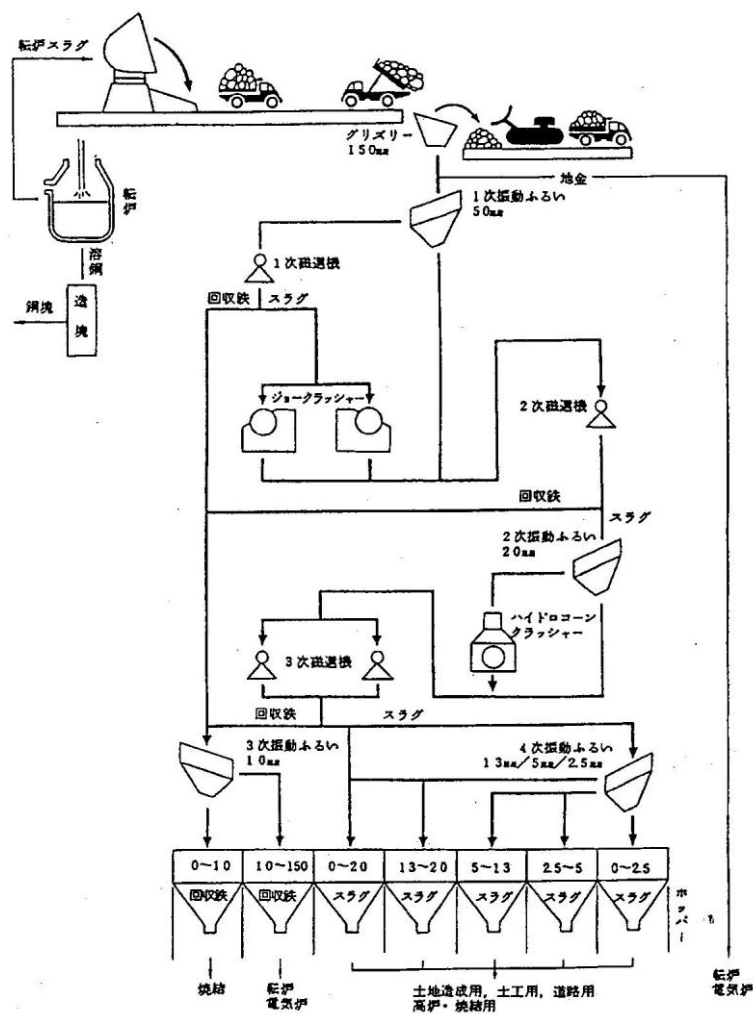


図 8.1-2 転炉スラグの破碎・ふるい分け工程例(鉄鋼スラグ協会資料)

(1) 化学特性

製鋼スラグの化学成分の分析結果の例を、表 8.1-2 に示す。一般に、製鋼スラグは石灰 (CaO)、及びシリカ (SiO₂) を主成分とし、その他に酸化第 1 鉄 (T-Fe)、酸化マグネシウム (MgO)、酸化マンガ (MnO) などが含まれている。

表 8.1-2 製鋼スラグの化学成分の分析例(単位:%)

	転炉スラグ	電気炉スラグ	
		酸化スラグ	還元スラグ
SiO ₂	13.8	17.7	27.0
CaO	44.3	26.2	51.0
Al ₂ O ₃	1.5	12.2	9.0
T-Fe	17.5	21.2	1.5
MgO	6.4	5.3	7.0
S	0.1	0.1	0.5
MnO	5.3	7.9	1.0
TiO ₂	1.5	0.7	0.7

(製鋼スラグ協会資料)

銑鉄を鋼に精錬するときに、不要成分であるケイ素、リン、硫黄等の除去ために生石灰を添加するが、精錬に要する時間が短時間であるため生石灰は一部そのままの状態製鋼スラグ中に残る。この生石灰は遊離石灰と呼ばれ、水と接すると水和反応 ($\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$) し、約 2 倍体積膨張する。

生成直後の製鋼スラグは、遊離石灰を数%含むが、屋外で養生すると雨水等により水和反応が促進されるため、その後の膨張量は減少する。このように、安定化させることをエージングといい、屋外で長期間養生することを通常エージング、蒸気を用いて短期間に安定化させる方法を蒸気エージングという。なお、製鋼スラグは高炉スラグと同様に水硬性があるが、その程度は弱く、水硬性の発現も一様でない。

(2) 物理特性

製鋼スラグの数カ所の製鉄所における粒度分布を、図 8.1-3 に示す。出荷される製鋼スラグは、通常 40mm 以下に破碎・整粒されたものであり、舗装用の粒度調整砕石と類似した粒度分布を示している。

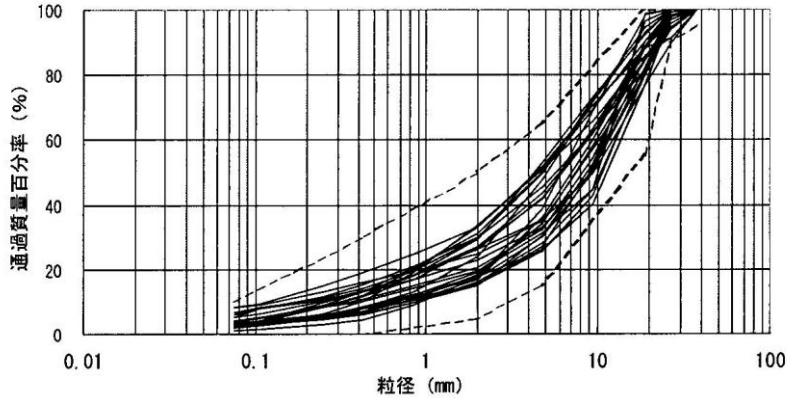


図 8.1-3 製鋼スラグの粒度分布例(鉄鋼スラグ協会資料)

製鋼スラグ単体の密度の測定例を、図 8.1-4 に示す。製鋼スラグの密度は、概ね $3.2 \sim 3.6 \text{ g/cm}^3$ の範囲にある。また、単位体積重量は締め固めの程度によって異なり、「港湾工事事用製鋼スラグ利用手引書」では湿潤単位体積重量の標準を、密な状態で 23.0 kN/m^3 、ゆるい状態で 21.0 kN/m^3 としているが、製鉄所によって変動するため利用する際には実際に使用するスラグの単位体積重量を試験により把握して設定する必要がある。

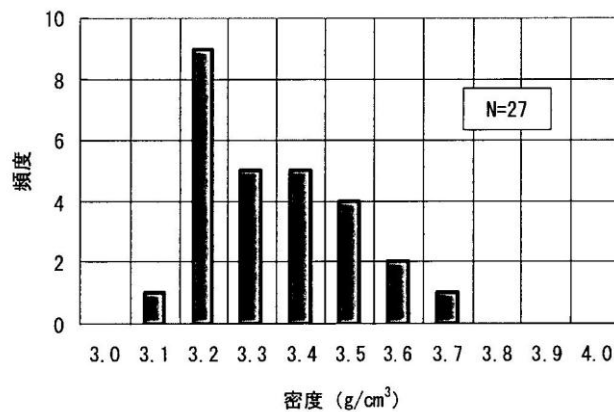


図 8.1-4 製鋼スラグ粒子の密度の測定例(鉄鋼スラグ協会資料)

製鋼スラグの内部摩擦角は一般の粒状材料と同様に、相対密度が低下すると小さくなる傾向にある。「港湾工事事用製鋼スラグ手引書」では、国内の製鉄所から生産されるスラグの試験結果より、設計に使用する内部摩擦角 (Φ) は 35° を標準とし、粘着力 (C) は考慮しないとしている。ただし、実際に使用する製鋼スラグについては、試験によりせん断特性を把握し適切に評価する必要がある。

製鋼スラグ(転炉スラグ)の透水性は経時的に低下する傾向にあり、長期的に透水性が求められる工種・工法には利用しないことが望ましい。ただし、電気炉スラグについては、透水性の低下はほとんど見られない。

(3) 用途

土木用資材として、製鋼スラグの用途については概ね表 8.1-3 に示すとおりである。舗装用路盤材としては JIS 化されており、他にサンドコンパクションパイル材、盛土・覆土材として利用されている。また、FS コンクリートの細骨材としての利用実績もある。

表 8.1-3 製鋼スラグの土木材料への適用・用途

主な利用用途	規格・基準類	
コンクリート用骨材 (細骨材、粗骨材)	○+	製鋼スラグと石炭灰(フライアッシュ)の混合により砂の代替え材として利用。「FS コンクリート利用手引書」が発刊されている。
	○+	製鋼スラグと高炉スラグ(および石炭灰)を組み合わせた固化体として利用。「鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアル」が発刊されている。
中詰め材	△	現段階の技術は開発途上にある。
裏詰め材	△	
舗装用材(路盤材)	◎	JIS A 5015「道路用鉄鋼スラグ」、「製鋼スラグ路盤設計施工指針」が発刊されている。
バーチカルドレーン材	△	
サンドコンパクション パイル用材	◎	「港湾工事用製鋼スラグ利用手引書」が発刊されている。
盛土・覆土	○	プレロード材として実績あり。

◎ : 品質基準が設けられ、利用可能 (鉄鋼スラグ協会資料)

○+ : 利用実績が多いもの、またはマニュアル類が整備されているもの

○ : 標準材料と同等、または利用可能性が高いもの

△ : 利用可能性があるが、今後の検討を要するもの

(4) 安全性

製鋼スラグを路盤材料として道路用に利用する場合は、「JIS A 5015 道路用鉄鋼スラグ」の規格に準じて使用可能である。

製鋼スラグを、港湾・空港等の海域に隣接した地域で地盤改良材等の土木用材料として利用する場合、周辺環境への影響を調査するため pH 及び有害物質の溶出量を計測している。製鋼スラグの溶出水の pH は通常高い値を示すが、これまでの観測例では海域で利用した場合には、海水成分による緩衝作用や希釈により周辺海域の pH の上昇はほとんどないとされている。(「港湾工事用製鋼スラグ利用手引書」)

一方、有害物質の溶出に関して、「海洋汚染及び海上災害の防止に関する法律」による溶出試験を実施した結果を、表 8.1-4 に示す。それによると、「海洋汚染防止法水底土砂基準」を満足しているが、ごく一部の製鋼スラグに重金属などの溶出量が基準値を超えているものがあるが、「これら溶出の恐れのあるスラグは、製造所において分別・管理されているため建設資材として一般に流通することはない」(港湾工事用製鋼スラグ利用手引書)とされている。

表 8.1-4 製鋼スラグの溶出試験結果(海洋汚染防止法水底土砂基準)

試験項目	単位	計量値	判定基準	定量限界
アルキル水銀化合物	mg/ L	不検出	検出されないこと	0.0005
水銀又はその化合物	"	"	0.005 以下	0.0005
カドミウム又はその化合物	"	"	0.1 以下	0.001
鉛又はその化合物	"	"	0.1 以下	0.005
有機リン又はその化合物	"	"	1 以下	0.1
六価クロム化合物	"	"	0.5 以下	0.04
ひ素又はその化合物	"	"	0.1 以下	0.005
シアン化合物	"	"	1 以下	0.1
PCB	"	"	0.003 以下	0.0005
銅又はその化合物	"	"	3 以下	0.005
亜鉛又はその化合物	"	"	5 以下	0.01
フッ化物	"	0~4.4	15 以下	0.1
トリクロロエチレン	"	不検出	0.3 以下	0.002
テトラクロロエチレン	"	"	0.1 以下	0.0005
ベリリウム又はその化合物	"	"	2.5 以下	0.01
クロム又はその化合物	"	"	2 以下	0.04
ニッケル又はその化合物	"	"	1.2 以下	0.01
バナジウム又はその化合物	"	"	1.5 以下	0.1
有機塩素化合物	mg/ kg	"	40 以下	4
ジクロロメタン	mg/ L	"	0.2 以下	0.002
四塩化炭素	"	"	0.02 以下	0.0002
1,2-ジクロロメタン	"	"	0.04 以下	0.0004
1,1-ジクロロエチレン	"	"	0.2 以下	0.002
シス-1,2-ジクロロエチレン	"	"	0.4 以下	0.004
1,1,1-トリクロロエタン	"	"	3 以下	0.0005
1,1,2-トリクロロエタン	"	"	0.06 以下	0.0006
1,3-ジクロロプロペン	"	"	0.02 以下	0.0002
チラウム	"	"	0.06 以下	0.0005
シマジン	"	"	0.03 以下	0.0003
チオベンカルブ	"	"	0.2 以下	0.001
ベンゼン	"	"	0.1 以下	0.001
セレン又はその化合物	"	"	0.1 以下	0.002

(鉄鋼スラグ協会資料)

8.2 建設資材としての利用方法

(1) 適用範囲

本項は、製鋼スラグを土工用資材として、サンドコンパクションパイル用材料として使用する場合に適用する。

製鋼スラグは、天然の砂や砂利と同様の粒状材料として、サンドコンパクション工法に使用できる。利用するには、粒状材料として製鋼スラグの性状をよく把握した上で使用することが大切である。

サンドコンパクション工法は、砂質土地盤の締め固めを目的とするものと、粘性土地盤を改良するためのものがあるが、製鋼スラグはいずれにも使用可能である。

(2) 試験評価方法

1) 品質基準と試験方法

サンドコンパクション工法は軟弱地盤改良工法の1つであり、振動荷重を用いて地盤内に砂または類似材料を圧入し、地盤内に締め固めた砂杭群を造成することにより、地盤の支持力向上や強度増加を図る工法である。

サンドコンパクション工法の改良効果は、砂質土地盤と粘性土地盤において、次のように評価される。

① 砂質土地盤

砂質土地盤の支持力、圧縮沈下、液状化に対する効果は、標準貫入試験 N 値、間隙比 e 、相対密度 D_r の関係より、締め固めの増加、つまり間隙比の減少として評価される。

② 粘性土地盤

粘性土地盤に対しては、短期的には周辺の粘性土より大きなせん断強度を有する締め固めた砂杭を造成し、砂杭と粘性土から成る複合地盤を形成することによる地盤の支持力増強効果、長期的には砂杭の排水効果により圧密促進と砂杭への応力集中による圧密沈下量の低減として評価される。

上記のサンドコンパクションパイル工法の改良効果を評価する上で必要とされる製鋼スラグの基本物理特性としては、粒度組成、粒子密度、単位体積重量等の基本性状の他、力学的性質として、せん断特性、透水性等がある。これらの品質については、JIS（日本工業規格）、土質試験法（土質工学会）に準じて行うものとする。

2) 環境安全性基準と試験方法

① 安全性基準と試験方法

製鋼スラグの品質は、製鉄所ごとの違いだけでなく、製鉄所内においても精錬工程の違いにより差異がみられることから、サンドコンパクションパイル用材料として海域または埋立て地等で利用する場合には、使用するスラグについて第4編 6.2(2)2) (表 6.2-3) (P. 39) に示す「環境リスク評価基準値」による溶出量及び含有量がこの値を満足するとともに、「海洋汚染及び海上災害の防止に関する施行令」による溶出試験行い、「海洋汚染防止法水底土砂基準」を満足しなければならない。

「環境リスク評価基準値」に関わる試験方法は、第4編 6.2(2)2) (P. 36) に準じる。また、「海洋

汚染防止法水底土砂基準」に係わる試験法は、「海洋汚染及び海上災害の防止に関する法律施行令第5条第1項」に規定する廃棄物に含まれる金属等の検定方法（昭和48環告14）に準じる。

② 安全性の管理

製鋼スラグを使用する場合は、ロット単位で溶出試験を行い、その結果を品質表示票として添付するものとする。品質表示票は、第4編6.2(2)2)（表6.2-4）（P.40）に準じる。

(3) 利用技術

1) 設計

製鋼スラグを用いたサンドコンパクションパイル工法の設計は、砂等の天然の粒状材料と同様に扱うことができる。ただし、製鋼スラグを用いたサンドコンパクションパイル工法の実施例は多くないため、既往の実施例または試験施工等の結果も考慮して適切に行わなければならない。

なお、製鋼スラグを粘性土地盤に適用したサンドコンパクションパイルの改良効果についてはまだ未解明な点があるとされており、「港湾工事中製鋼スラグ利用手引書」では原則として高置換率の改良に適用することとしている。

2) 施工

製鋼スラグを用いたサンドコンパクションパイル工法の試験施工では、陸上部及び海域部での施工のいずれも天然砂と同等の施工性が得られている。

施工現場で製鋼スラグを貯蔵する場合は、降雨等による溶出水のpHが高くなるため、周辺に影響を及ぼすおそれがある場合には中和処理を行うなどの配慮が必要であるとともに、溶出水の排水には十分注意しなければならない。

3) 記録及び保管

製鋼スラグをサンドコンパクションパイル工法に使用した場合には、発注者は設計図書（平面図、断面図、数量等）及びリサイクル材料の試験成績票を施工図面とともに保管し、繰り返し再利用と処分の際に利用できるように備えておくものとする。

(4) 課題

1) 物理・化学特性

製鋼スラグは、水硬性及び膨張性といった天然の砂や砂利にはない特有の性質を有する材料であり、これらについての長期的な変化についての確認が必要である。また、透水性については、水硬性により経時的に低下する傾向にあり、その傾向を把握した上で適切に利用しなければならない。

2) 環境安全性

製鋼スラグは、ごく一部のものは重金属等の溶出量が基準値を超えるものがあることから、周辺地盤あるいは地下水等に及ぼす環境安全性に十分配慮しなければならない。

3) 供給性

港湾工事・空港工事等では、短期間に大量の材料を使用する機会が多いため、製鋼スラグの供給量について事前の調査が必要である。

(参考文献)

- 1) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグ統計年報（平成 18 年度実績）、平成 19 年 8 月
- 2) (財) 沿岸開発技術研究センター・鉄鋼スラグ協会：港湾工事事用製鋼スラグ利用手引書、平成 12 年 3 月
- 3) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグ、インターネット検索
- 4) 中川他：鉄鋼スラグを混合した軟弱泥土の有効利用、土木学会第 62 回年次学術講演会論文集、3-383、平成 19 年 9 月
- 5) 高橋：石炭灰および鉄鋼スラグの活用技術、港湾技研資料、No.886、1997. 11

V. 「付属資料」に関する追補

付属資料として「5. 再生資材の道路利用におけるライフサイクル評価事例」を追加した。

5. 再生資材の道路利用に関するライフサイクル評価事例

他産業再生資材の適用性の検討方法として、LCA（ライフサイクルアセスメント）やLCC（ライフサイクルコスト）による方法が考えられる。

他産業再生資材の幾つかのケースで試算したLCA、LCCの評価事例を以下に示す。

1 廃ガラス（発泡）の盛土への利用ケースの設定

1.1 発泡廃ガラスの概要

発泡廃ガラスは様々な利用方法が提案されているが、ここでは、軽量盛土材として利用する方法について分析を行った。廃ガラスを原料とした軽量盛土材は、 $0.4\sim 0.5\text{g}/\text{cm}^3$ ほどの材料で、廃ガラスを加熱・溶融・発泡させ、 $2\sim 75\text{mm}$ としたものである。

1.2 設定条件

発泡廃ガラスを軽量盛土材に利用する場合としない場合などを比較検討することとし、基本的な盛土構造は、図1のように設定した。

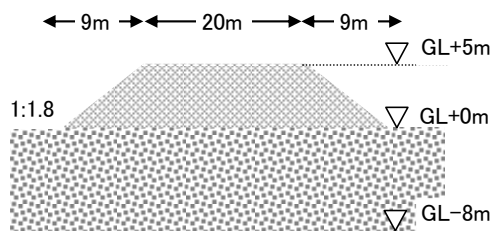
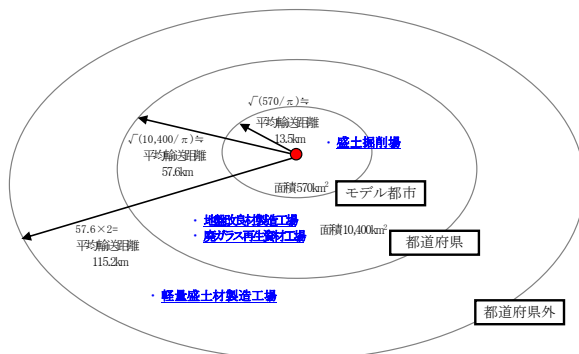


図1 盛土構造の設定

国内での平均的な値を求めるため、都道府県、モデル都市、現場などを図2のように設定した。都道府県の値は、全都道府県の平均値、モデル都市は政令指定都市の平均値を用いた。各資材の製造工場の配置は、工場数、全国の分布状況を考慮して設定した。これらの配置により各資材の輸送距離を設定した。



※疑似半径：対象面積を円と仮定してその半径を平均的な輸送距離と設定した。

例えば、 $r^2\pi = 570\text{km}^2$ の場合、 $r = \sqrt{570/\pi} \approx 13.5\text{km}$

図2 現場、工場等の配置と輸送距離の設定

評価対象範囲は、図3のように設定した。廃ガラスを収集して再生資材工場に運ぶまでは、発泡廃ガラスを製造するしないかわからず行われるものとして、評価対象外とした。

また、盛土材が撤去・廃棄されることはほとんどないものとして、これも評価対象外とした。

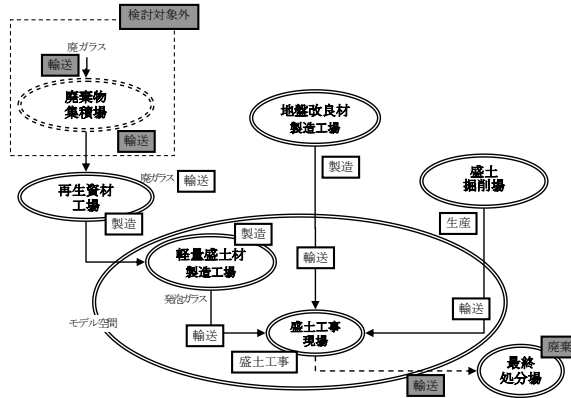


図3 評価範囲の設定

1.3 検討ケース

検討ケースは、表1に示す3ケースとした。Case1は全て普通盛土材を用いた場合、Case3は全て発泡廃ガラス軽量盛土材を用いた場合、Case2はその中間とした。

表1 検討ケース

	Case1	Case2	Case3
工法	地盤改良工法	地盤改良工法+荷重軽減工法	地盤改良工法+荷重軽減工法
普通盛土材	100%	50%	0%
軽量盛土材	0%	50%	100%
地盤改良率	30%	14%	7%
地盤改良材	セメント	セメント	セメント

1.4 LCA

設定した条件で、LCAの検討を実施した。まず、それぞれのケースのLCI（Life Cycle Inventory：ライフサイクル各段階で、インプット・アウトプットされる原料とエネルギーおよび廃棄物の量を一覧表にすること）を行ったところ、表2のようになった。

表2の結果および環境負荷原単位の調査結果から、環境負荷物質の排出量を算定した。CO₂排出量の算定例を図4に示す。従来工法として設定したCase1は、CO₂排出量が非常に多くなった。これに比べ発泡廃ガラスを用いたCase2とCase3では半分近くになっている。

Case1は材料のCO₂排出分が大半を占めているが、これはセメントのCO₂排出原単位が大きいことに起因する。したがって、セメントの使用量が減るCase2とCase3では排出量が小さくなった。

表 2 各ケースでの LCI

		単 位	Case1	Case2	Case3
			軽量盛土 混合率 0%	軽量盛土 混合率 50%	軽量盛土 混合率 100%
材 料 量	普通盛土材	t	29,178	14,589	0
	軽量盛土材	t	0	2,432	4,863
	セメント	t	16,186	7,200	3,574
燃 料 量	施工	L	9,912	6,977	5,799
	輸送 (軽油消費量)	L	1,326,245	1,143,859	1,270,293

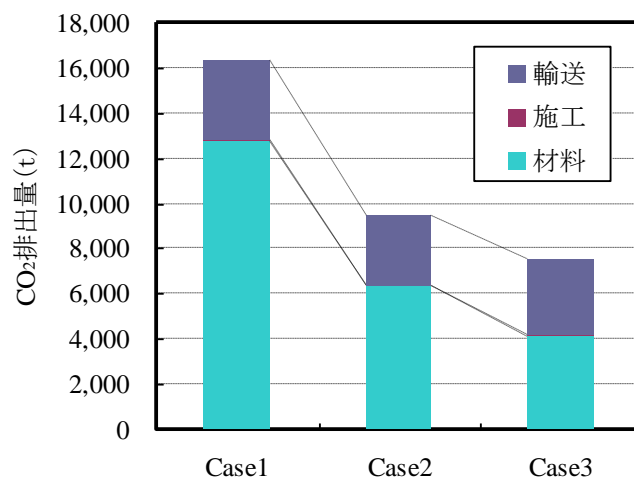


図 4 各ケースでの CO₂ 排出量の算出結果

1.5 LCC

設定した条件で、LCC の検討を実施した。盛土工事の数量は、表 3 のようになった。材料費、輸送費、施工人件費、諸経費を含む工事費は「国土交通省土木工事標準積算基準書」に基づき算出した。工種毎に代価を算出し、それに数量を掛け合わせて工事費とした。

表-3 盛土工事の数量

工種	対象ケース	単位	数量
敷均し締固め工	Case1, 2, 3	m ³	16,210
粉体噴射攪拌工 (杭長 8m)	Case1	本	1,856
	Case2	本	863
	Case3	本	464
盛土材	Case1, 2, 3	m ³	16,210

盛土工事では維持管理、解体撤去・処分する事例はほとんどないものとして、LCCの比較は、初期の建設コストだけの比較となった。結果を図5に示す。従来工法として設定したCase1がもっともコストが低く、発泡廃ガラスを用いたCase2と3は非常にコストが高く算定された。これは材料費の違いが大きく影響しており、発泡廃ガラス材が高価であることに起因している。

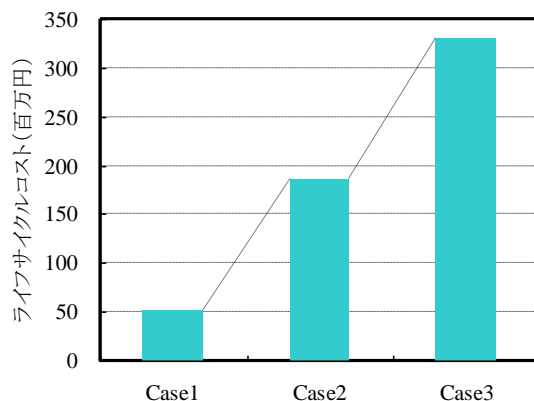


図5 各ケースでのLCC算出結果

2 非金属スラグの舗装用骨材への利用ケースの設定

2.1 非金属スラグの概要

非鉄金属スラグは、舗装用に利用することを考えるとある程度まとまった量が確保できることが必要である。銅スラグ、フェロニッケルスラグは、非鉄金属スラグの中でも比較的発生量が多く、舗装への利用検討事例もあるため、この二つを対象とした。

非鉄金属スラグ (Fe-Ni、Cu) は、細骨材および路盤材との置き換えとして利用することを想定した。

2.2 設定条件

モデル都市空間の条件は、都市部での利用を想定し、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。

表4 モデル都市空間

項目	設定条件
対象面積	570 km ²
道路率	3.1%
道路面積	17.67 km ²
道路の構造	アスファルト舗装

備考；政令指定都市の平均を算出

①道路率(%)=250.32 km²(道路面積合計)÷8006.87 km²(市町村面積合計)

②道路面積(km²)=570 km²(対象面積)×3.1%(道路率)

評価対象範囲を図6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。

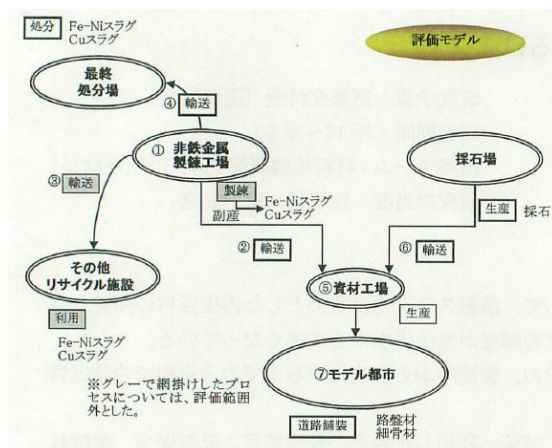


図-6 評価範囲の設定

2.3 検討ケース

非鉄金属スラグの舗装への利用を考えた場合、細骨材および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 5 検討ケース

	置き換え対象	Case0	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
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%

2.4 LCA

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 と設定した。この条件の場合、表 4 に示すモデル都市では、舗装面積 1,767,000 m²/年、アスコン需要量 176,700 m³/年、路盤材需要量 530,100 m³/年となる。なお、舗装の耐久性は、スラグを使用しても同じと仮定した。非鉄金属に関する基礎データを表 6 に示す。

表 6 非鉄金属に関する基礎データ

	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)	313,244 m ³ /年	126,557 m ³ /年

1) 輸送および最終処分

輸送は、砕石の場合、採石場が都道府県各 1 つあると仮定し、都道府県の疑似半径 57.6km と設定した。また、Fe-Ni スラグは全国で 3 工場なので、15 都道府県の疑似半径(偏平率 0.5 楕円の長辺) 315.2km、Cu スラグは全国で 6 工場なので、Fe-Ni スラグの疑似半径の 1/2 の 157.6km と設定した。また、現状で、非鉄金属スラグは全て消費されており、最終処分されていないため、最終処分量=0 とした。

2) 環境負荷原単位

環境負荷の算出に当たっては、JEMAI-LCA Pro ((財) 産業環境管理協会) を用い、基本的にこのソフトにある原単位を用いた。

3) 環境負荷の試算結果

環境負荷の試算結果を表 7 に示す。スラグ使用率が骨材全体の 60%程度以上に設定した Case3~5 では、全般的に環境負荷量が大きくなった。

表 7 環境負荷量

	エネルギー量 (MJ)	排出量 (kg)			
		CO ₂	SO _x	NO _x	SPM
Case0	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 廃プラスチックの舗装用骨材への利用ケースの設定

3.1 廃プラスチックの概要

廃プラスチックはアスファルト混合物用骨材として利用することを想定した。

3.2 設定条件

モデル都市空間の条件は、都市部での利用を想定し、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。

表8 モデル都市空間

項目	設定条件
対象面積	570 km ²
道路率	3.1%
道路面積	17.67 km ²
道路の構造	アスファルト舗装

備考；政令指定都市の平均を算出

①道路率（%）=250.32 km²（道路面積合計）÷8006.87 km²（市町村面積合計）

②道路面積（km²）=570 km²（対象面積）×3.1%（道路率）

評価対象範囲は図7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、舗装工事とする。ただし、廃プラスチックは、再生するしないに関わらず、集積場に集められるものとし、その一次加工および輸送は評価対象範囲外とする。

なお、耐用期間を超えた舗装材は、ほぼ100%再利用されることより廃棄工程については評価対象としなかった。

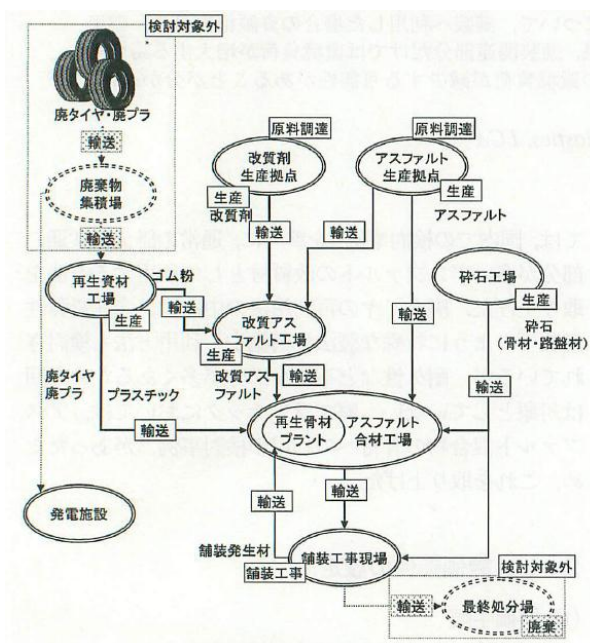


図7 評価範囲

3.3 検討ケース

検討ケースとしては、文献調査の結果、廃プラスチックはアスファルト混合物への利用の可能性が高く、特に、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、表9に示す3ケースを設定した。ケース2とケース3は、アスファルト混合物の粗骨材として廃プラスチックを配合したケースであり、それぞれの骨材体積に対する配合割合を5%と10%と設定した。なお、路盤材はバージン材を用いるものとした。

舗装のサイクルタイムを30年とし、その中で切削オーバーレイ（表層）、打ち換え（表層・基層・上層路盤）、撤去（全層）を10年間隔で実施することとした。

また、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¹⁾、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。

表9 通常材料による舗装での設定ケース

	ケース1	ケース2	ケース3
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使用)	密粒度アスファルト混合物 13 (廃プラスチック配合率 5%)	密粒度アスファルト混合物 13 (廃プラスチック配合率 10%)
	t = 5 cm	t = 5 cm	t = 5 cm
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使用)	粗粒度アスファルト混合物 20 (廃プラスチック配合率 5%)	粗粒度アスファルト混合物 20 (廃プラスチック配合率 10%)
	t = 5 cm	t = 5 cm	t = 5 cm
上層路盤	粒調碎石路盤	粒調碎石路盤	粒調碎石路盤
	t = 15 cm	t = 15 cm	t = 15 cm
下層路盤	クラッシュラン路盤	クラッシュラン路盤	クラッシュラン路盤
	t = 15 cm	t = 15 cm	t = 15 cm
電力	廃プラスチック発電	公共発電 +廃プラスチック発電	公共発電

(1) 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年とし、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8）から舗装資材の需要量を算出すると、表10のようになった。

表 10 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

(2) 基本資材の需要量

舗装資材の需要量（表 10）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 11 に示し、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需要量を算出した結果を併記する。なお、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。

表 11 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	
		ストレートアスファルト混合物		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%)	
		表層	基層	表層	基層	表層	基層
需要量 (容積)	m ³ /yr	176,700	176,700	176,700	176,700	176,700	176,700
表層・基層材密度	t / m ³	2.37	2.36	2.22	2.19	2.16	2.15
需要量 (質量)	t/yr	418,779	417,012	392,274	386,973	381,672	379,905
アスファルト	t/yr	21,832	19,858	19,966	18,055	20,078	18,250
粗骨材	t/yr	226,260	285,951	186,073	239,514	165,258	221,405
細骨材・石粉	t/yr	170,687	111,203	156,098	101,111	156,126	138,390
プラ骨材 (廃プラ)	t/yr	0	0	10,038	9,866	20,078	19,950
バインダ配合率 (対骨材)	質量%	5.5	5.0	5.4	4.9	5.6	5.0
空隙率	質量%	4.0	5.0	4.0	5.0	4.0	5.0
粗骨材	質量%	57.0	72.0	50.0	65.0	45.7	61.2
細骨材・石粉	質量%	43.0	28.0	41.9	27.4	43.2	38.2
プラ骨材	質量%	0.0	0.0	2.7	2.7	5.6	5.5

(3) 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 12 に示す。

表 12 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	ケース 3	輸送距離 (設定値)
		ストレートアス ファルト混合物	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	41,690	38,021	38,328	115km
砕石(プラント)	t	794,101	682,796	681,179	57.6km
プラ骨材(プラント)	t	0	19,904	40,028	115km
アスファルト合材(現場)	t	835,791	779,247	761,577	13.5km
軽油消費量					
アスファルト(プラント)	L	276,153	251,852	253,883	
砕石(プラント)	L	2,630,063	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	648,783	604,890	591,174	
合計	L	3,554,999	3,250,006	3,366,272	

(4) 検討ケースにおける発電量の設定

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。使用する廃プラスチック量は表 11 の通りであるので、これと廃プラスチック質量当たりの発電量²⁾ $1.79 \times 10^3 \text{ kWh/t}$ 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ない。従って、比較対象毎に電力量を等しく設定した場合、図 8 のようになった。

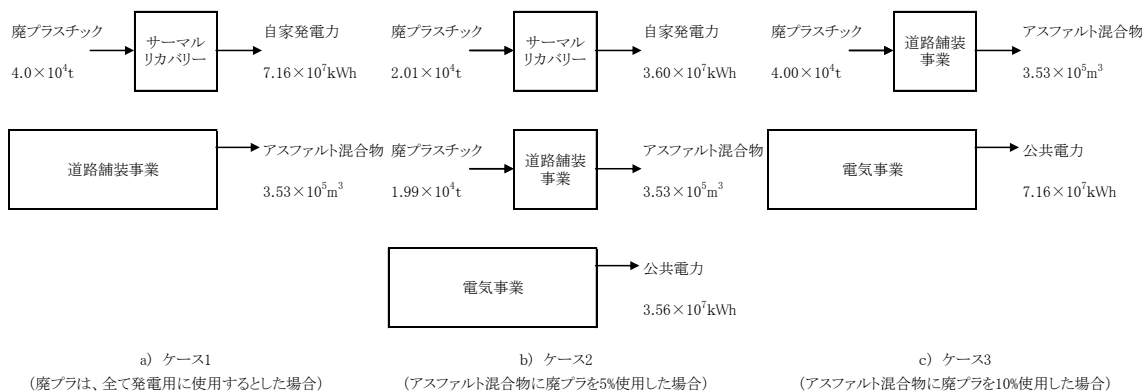


図 8 ストレートアスファルト舗装利用の場合

3.4 LCA

舗装用に使わ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³⁾。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 13 に値を示す。

表 13 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

(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 14 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。

表 14 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	-

(3) 砕石の原単位

砕石の環境負荷原単位の算出結果を表 15 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。

表 15 砕石の環境負荷原単位(輸送除く)

		エネルギー 一量 (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							
重機 消費	軽油 (L)	263.55	1.01E+04	6.51E+02	2.00E-02	2.01E-01	※1)
	ガソリン(L)	232.05	8.15E+03	5.73E+02	1.76E-02	1.77E-01	
プラント 消費	電力(kWh)	4861.50	4.42E+04	1.94E+03	2.51E-01	7.88E-01	
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

※1) 砕石工場へのヒアリング調査結果より

(4) 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 16 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。

表 16 再生 PO ペレット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)	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

(5) 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 17 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 9.7L/t）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 9.7L/t となった。

これをもとにして、さらに表 17 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 17 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 13 と表 17 から求めて使用した。

表 17 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

(6) 舗装工事に係わる原単位

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

$$=60.6 \times 2 = 121.2 \text{ (L/1000 m}^2\text{)}$$

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 18 のようになった。

表 18 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

(7) 廃棄物発電に係わる原単位

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^{3) 5)}に分散していたので、これらを収集して表 19 のように設定した。

表 19 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)	備考
廃プラ発電 (t 当たり)	※1 2.93E+04	※2 2.83E+03	※2 1.40E-01	※2 1.63E+01	—	※1 文献 5) ※2 文献 2)

(8) 再生資材利用舗装の環境負荷量の算定

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 20 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 9 のようになった。廃プラスチック利用舗装のケース 2, 3 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 9 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。

これらの結果より、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。

表 20 環境負荷量の算定結果

		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+05	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	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 3	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

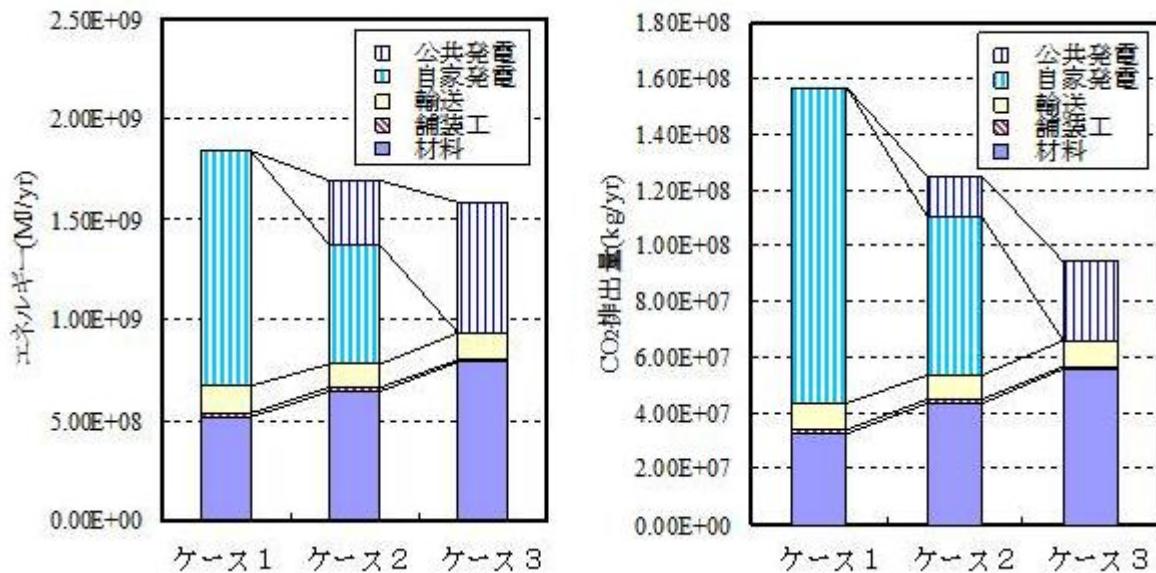


図 9 エネルギー消費量と CO₂ 排出量の算出結果

3.5 LCC

新設、切削オーバーレイ、打ち換え、撤去における工事費をケース毎に算定した。その結果、全ケースに共通して、打ち換え時のコストが大きな割合を占めた。これは、打ち換えが表層・基層・上層路盤の撤去・敷設を要し、施工量が大きいに起因する。また、ケース間での比較からは、廃プラスチックの使用によりライフサイクルコストが15～25%増加する結果となった。舗装の工事費のうち8～9割を材料費が占めており、バージン材より割高な再生資材の材料費が、ライフサイクルコストの増加に影響している。

表 21 ケーススタディ結果の比較

工種	金額（百万円/年）					
	ケース 1		ケース 2		ケース 3	
		構成比		構成比		構成比
新 設	2,178	36.1%	2,547	36.6%	2,793	36.9%
切削オーバーレイ	953	15.8%	1,137	16.3%	1,260	16.6%
打ち換え	2,451	40.6%	2,820	40.5%	3,066	40.5%
撤 去	458	7.6%	458	6.6%	458	6.0%

合 計	6,041	100.0%	6,963	100.0%	7,577	100.0%
-----	-------	--------	-------	--------	-------	--------

ケース 1 を 100 とした場合: 100 115 125

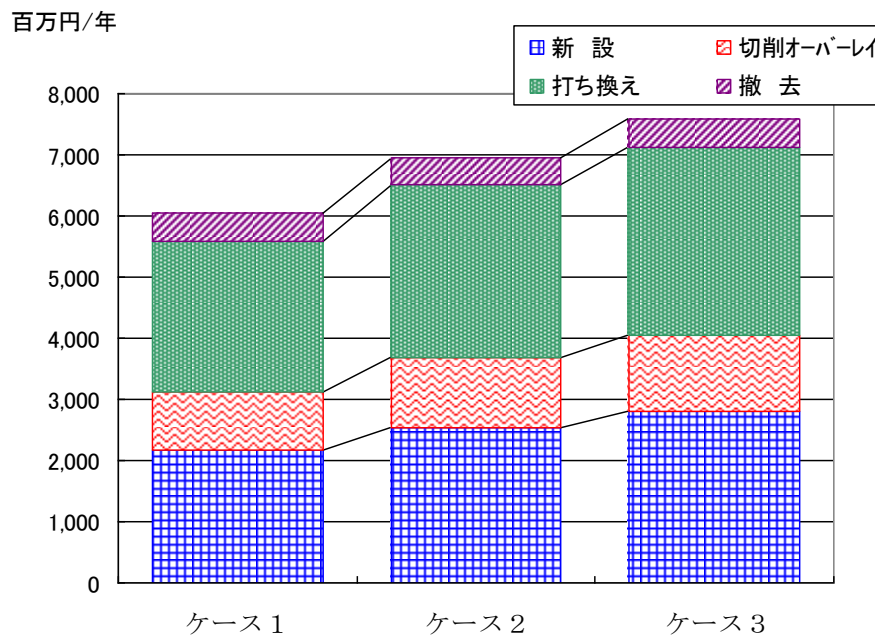


図 10 ケーススタディ結果の比較

4 廃タイヤの舗装用骨材への利用ケースの設定

4.1 廃タイヤの概要

廃タイヤはアスファルト改質剤として利用することを想定した。

4.2 設定条件

モデル都市空間の条件は、都市部での利用を想定し、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。

表 22 モデル都市空間

項目	設定条件
対象面積	570 km ²
道路率	3.1%
道路面積	17.67 km ²
道路の構造	アスファルト舗装

備考；政令指定都市の平均を算出

①道路率 (%) = 250.32 km² (道路面積合計) ÷ 8006.87 km² (市町村面積合計)

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

評価対象範囲は図 11 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、舗装工事とする。ただし、廃タイヤは、再生するしないに関わらず、集積場に集められるものとし、その一次加工および輸送は評価対象範囲外とする。

なお、耐用期間を超えた舗装材は、ほぼ 100%再利用されることより廃棄工程については評価対象としなかった。

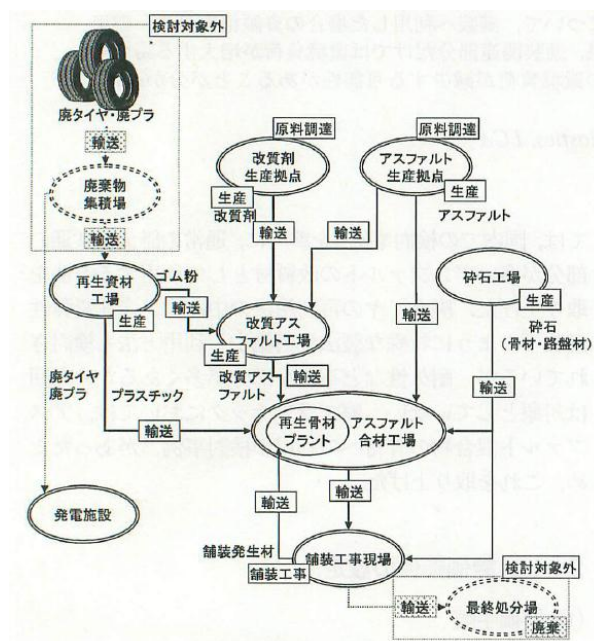


図-11 評価範囲

4.3 検討ケース

検討ケースを表 23 に示す。文献調査の結果、廃タイヤはアスファルトの添加剤としての利用の可能性が高いものと考えられた。ケース 2 は改質アスファルト II 型の代替と考えられるため、以降ケース 1 と比較して表示する。路盤材はバージン材を用いるものとした。

舗装のサイクルタイムは改質アスファルト使用による耐久性向上を考慮し 40 年とし、その中で、打換え（表層・基層・上層路盤）、撤去（全層）を 20 年間隔で実施することとした。

また、廃タイヤは、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⁴⁾、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。

表 23 通常材料による舗装での設定ケース

	ケース 1	ケース 2
表層	密粒度アスファルト混合物 13 (改質アスファルト II 型使用)	密粒度アスファルト混合物 13 (廃タイヤ再生資材 15% 添加)
	t = 5 cm	t = 5 cm
基層	粗粒度アスファルト混合物 20 (改質アスファルト II 型使用)	粗粒度アスファルト混合物 20 (廃タイヤ再生資材 15% 添加)
	t = 5 cm	t = 5 cm
上層路盤	粒調碎石路盤	粒調碎石路盤
	t = 15 cm	t = 15 cm
下層路盤	クラッシュラン路盤	クラッシュラン路盤
	t = 15 cm	t = 15 cm
電力	廃タイヤ発電	公共発電

(1) 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 22）から舗装資材の需要量を算出すると、表 24 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」⁶⁾を参考にして、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。

表 24 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

(2) 基本資材の需要量

前項で得られた舗装資材の需要量（表 24）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 25 に示す。なお、表 25 には廃タイヤ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需要量を算出した結果を併記する。

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として改質アスファルト II 型と同じ耐用年数に設定した。

表 25 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	
		改質アスファルト混合物		廃タイヤ利用混合物 (アスファルトにゴム粉 15%)	
		表層	基層	表層	基層
需要量 (容積)	m ³ /yr	29,450	29,450	29,450	29,450
表層・基層材密度	t/m ³	2.37	2.36	2.38	2.37
需要量 (質量)	t/yr	69,797	69,502	70,091	69,797
アスファルト	t/yr	3,457	3,144	3,106	2,812
改質材	t/yr	182	165	0	0
粗骨材	t/yr	37,710	47,659	37,869	47,860
細骨材・石粉	t/yr	28,448	18,534	28,568	18,612
ゴム粉 (廃タイヤ)	t/yr	0	0	548	499
備考 (配合)		(改質混合物)	(改質混合物)	(改質混合物)	(改質混合物)
バインダ配合率 (対骨材)	質量%	5.5	5.0	5.5	5.0
改質剤配合率 (対アスファルト)	質量%	5.0	5.0	0.0	0.0
空隙率	質量%	4.0	5.0	4.0	5.0
粗骨材	質量%	57.0	72.0	57.0	72.0
細骨材・石粉	質量%	43.0	28.0	43.0	28.0
ゴム粉 (対アスファルト)	質量%	0.0	0.0	15.0	15.0

(3)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 26 に示す。

表 26 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(比較用)	ケース2	輸送距離 (設定値)
		改質アスファルト混合物	廃タイヤ利用混合物 (アスファルトにゴム粉 15%)	
アスファルト(プラント)	t	0	0	115 km
アスファルト(改質アス工場)	t	6,601	5,918	115 km
改質剤(改質アス工場)	t	347	1,047	115 km
改質アス(プラント)	t	6,948	6,964	13.5 km
砕石(プラント)	t	132,350	132,910	57.6 km
アスファルト合材(現場)	t	139,299	139,888	13.5 km
軽油消費量				
アスファルト(プラント)	L	0	0	
アスファルト(改質アス工場)	L	43,724	39,198	
改質剤(改質アス工場)	L	2,301	6,933	
改質アス(プラント)	L	5,394	5,406	
砕石(プラント)	L	438,344	440,197	
アスファルト合材(現場)	L	108,130	108,588	
合計	L	597,893	600,322	

(4)検討ケースにおける発電量の設定

廃タイヤを舗装に利用しない場合、全て発電に使用するとした。使用する廃タイヤ量は表 25 の通りであるので、これと廃タイヤ質量当たりの発電量⁷⁾ $2.18 \times 10^3 \text{ kWh/t}$ 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ない。従って、比較対象毎に電力量を等しく設定した場合、図 12 のようになった。

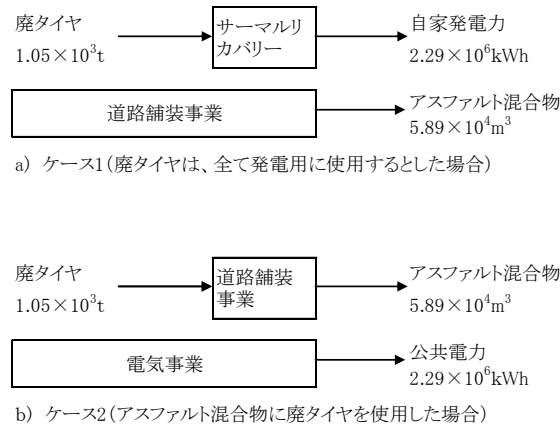


図 12 改質アスファルト舗装利用の場合

4.4 LCA

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³⁾。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 27 に値を示す。

表 27 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

(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 28 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 29 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。

表 28 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 29 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 一量 (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 1t あたり								
プラント 消費	A 重油 (L)	6.50	2.54E+02	1.80E+01	8.45E-05	5.25E-03	6.18E-04	※1)
	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	-	※2)
	改質剤 (SBS) (t)	0.05	3.70E+02	1.50E+02	1.58E-06	6.65E-05	1.97E-05	
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	-	

※1) 日本改質アスファルト協会へのヒアリング調査結果

※2) JEMAI-LCA の SBR の値を流用

(3) 砕石の原単位

砕石の環境負荷原単位の算出結果を表 30 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。

表 30 砕石の環境負荷原単位 (輸送除く)

		エネルギー 一量 (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								
重機 消費	軽油 (L)	263.55	1.01E+04	6.51E+02	2.00E-02	2.01E-01	2.27E-02	※1)
	ガソリン (L)	232.05	8.15E+03	5.73E+02	1.76E-02	1.77E-01	2.00E-02	
プラント 消費	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	

※1) 砕石工場へのヒアリング調査結果より

(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 31 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」、「粉砕」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、粉砕 75kWh であったので、質量当たりの消費電力を $(11\text{kWh}+11\text{kWh}+75\text{kWh}+75\text{kWh}) \div 2\text{t}=0.086\text{kWh/t}$ として計算した。

表 31 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、粉砕)	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

(5) 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 32 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 1t 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 9.7L/t）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 9.7L/t となった。これをもとにして、さらに表 32 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 32 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 27 と表 32 から求めて使用した。

表 32 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

(6) 舗装工事に係わる原単位

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

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 33 のようになった。

表 33 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

(7) 廃棄物発電に係わる原単位

廃タイヤによる発電に係わる原単位としては、様々な文献^{5) 8)}に分散していたので 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。

表 34 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)	備考
廃タイヤ発電 (t 当たり)	※1 3.32E+04	※2 1.77E+03	—	—	—	※1 文献 5) ※2 文献 8)

(8) 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 35 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 13 のようになった。

廃ゴム利用舗装のケース2では、改質アスファルトタイプの利用であるため、ケース1と比較する。図13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29）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31）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。

表 35 環境負荷量の算定結果

		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 (比較用)	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2	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

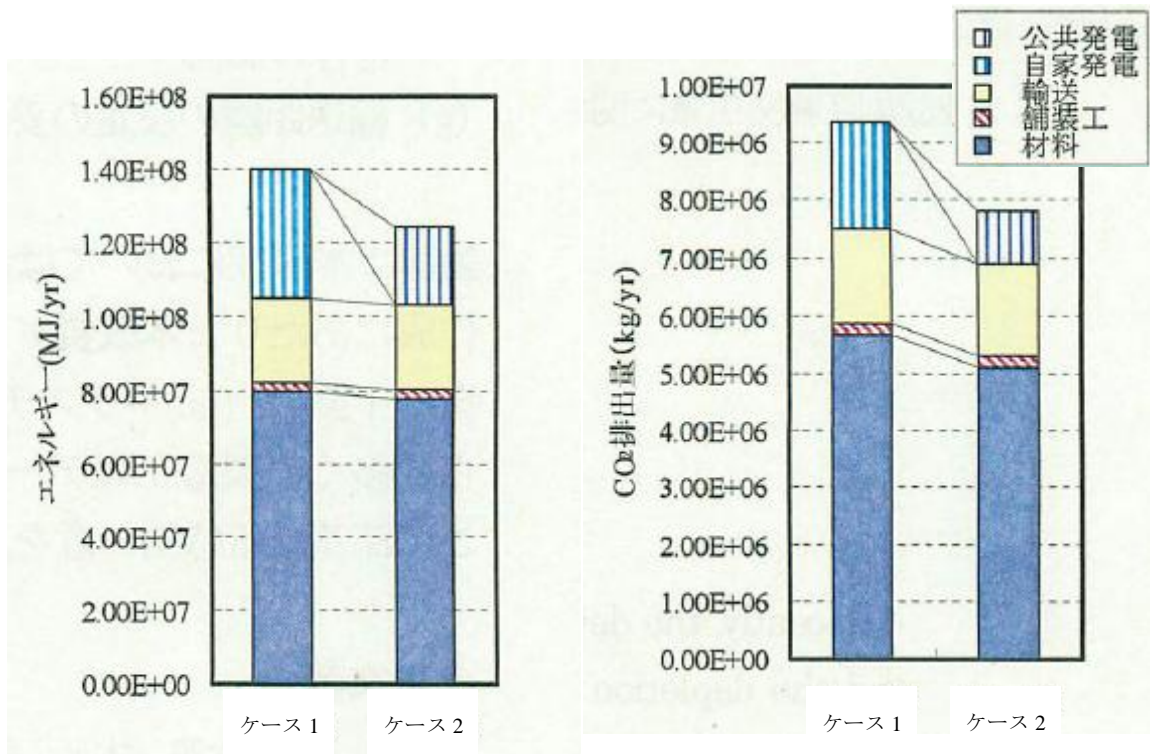


図 13 エネルギー消費量とCO₂排出量の算出結果

4.5 LCC

設定したモデル条件のもと LCC 分析を実施した結果、再生資材の材料費が通常材と比較して高いことがライフサイクルコストの増加の要因であることが明らかとなった。

また、廃タイヤ使用の環境的な側面を 4.4 からみると、「ゴム粉（廃タイヤ再生資材）を改質剤として利用したケース 2 は環境負荷がやや低減される」結果となっていることがわかる。本検討の条件下においては、廃タイヤの改質材としての利用はコスト的には不利になるが環境的に優れる結果となった。

表 36 ケーススタディ結果の比較

工種	金額（百万円/年）			
	ケース 1		ケース 2	
		構成比		構成比
新設	1,822	25.1%	2,600	31.8%
打ち換え	2,027	28.0%	2,805	34.3%
	322	4.4%	322	3.9%
撤去時	344	4.7%	344	4.2%
	521	7.2%	521	6.4%

合計	5,037	69.5%	6,592	80.6%
----	-------	-------	-------	-------

ケース 1 を 100 とした場合： 100 131

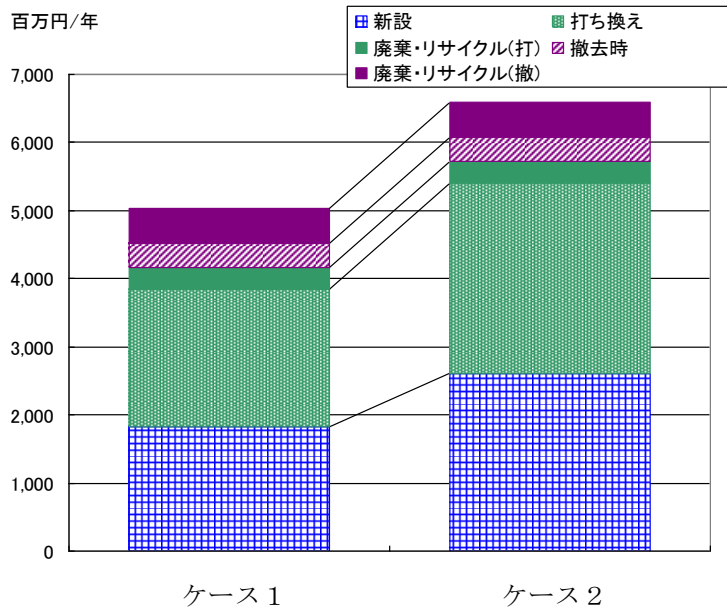


図 14 ケーススタディ結果の比較

(参考文献)

- 1) 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 2006 年、pp. 3、2007. 12
- 2) 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、pp. 102、2006. 9
- 3) 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
- 4) 日本自動車タイヤ協会：タイヤリサイクルハンドブック、pp. 25、2007
- 5) 資源エネルギー庁：総合エネルギー統計 2006 年度、2008. 5
- 6) 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、pp. 59、2001. 9
- 7) ブリヂストン：社会・環境報告書 2005、pp. 66、2005. 7
- 8) 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、pp. II-62、2008. 5

土木研究所資料
TECHNICAL NOTE of PWRI
No.4293 March 2014

編集・発行 ©独立行政法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

独立行政法人土木研究所 企画部 業務課
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754