

(54) 廃棄物溶融スラグ利用アスファルトの磨耗粉塵 におけるスラグの寄与

高橋 史武^{1*}・貴田 晶子²・島岡 隆行¹

¹九州大学大学院 工学研究院 環境都市部門 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

²(独)国立環境研究所 循環型社会・廃棄物研究センター (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

* E-mail: f-takahashi@doc.kyushu-u.ac.jp

廃棄物溶融スラグをアスファルト用細骨材として用いた場合、磨耗粉塵中にどの程度、スラグ由来のものが含まれるか検討した。X線回折パターン中の SiO_2 ピーク強度を利用した推定方法と重金属濃度を用いた推定方法の両者において、粉塵粒径別のスラグ寄与率に対して同様の傾向が得られた。吸引リスクが高い $75\mu\text{m}$ 以下の粉塵粒子ではスラグ寄与率がアスファルト合材作成時のスラグ配合率を下回っており、 $150\mu\text{m}$ ～ 1.0mm の粒子では逆に粉塵中のスラグ寄与率が配合率を上回った。スラグは天然骨材よりも微粒子化されにくく、スラグ利用アスファルト合材からの磨耗粉塵(特に $75\mu\text{m}$ 以下の微粒子)の重金属濃度をアスファルト合材の重金属濃度と等しいとすることは、粉塵の重金属濃度を過大評価する恐れがある。

Key Words : Slag, Asphalt, Abrasion dust

1. 背景

廃棄物溶融スラグとは廃棄物もしくは廃棄物焼却残渣を $1200\sim 1400^\circ\text{C}$ 程度の高温で溶融処理したガラス系固化物である。近年、一般廃棄物を中心に廃棄物の溶融処理が急速に導入されつつあり、平成17年度(2006年)では41.7万トンの溶融スラグが生産されている¹⁾。最終埋立地の慢性的な逼迫状況がこの背景にあり、従来は埋め立てられていた廃棄物やその焼却残渣を溶融処理でスラグ化し、それらをリサイクルに回していくことで埋立量の減量化を促進していくことが期待されている。溶融スラグのリサイクルとしては土木・建設資材への利用が主に考えられ、例えばアスファルト用細骨材として溶融スラグを利用することが挙げられる。スラグ利用アスファルトに関して、Kouda²⁾は廃棄物溶融スラグを細骨材として0～45%利用した場合での耐磨耗性をMarshall試験および疲労抵抗試験で確認している。そこではスラグ含有率が25%以下であるなら天然骨材使用アスファルトと同程度の品質を示し、スラグ含有率を60%まで増加させても品質上問題はないと報告している。また、菊池ら³⁾による検討では10%程度までのスラグ利用では天然骨材使用アスファルトと同程度の品質を維持できると報告し

ている。このように利用品質の面からは比較的多くの検討がなされ、良好な結果が得られている反面、環境安全性からの品質要件については土壤環境基準をもとにした有害物質の含有量と短期的な溶出性が考慮されるだけに留まっている。有害物質の長期的な環境排出挙動や、その後の経口摂食、肺への吸引による健康リスクを含めた環境影響評価はほとんど検討されていない。溶融スラグの利用に伴う健康リスク・環境影響に不明な部分が多いために、これが溶融スラグのリサイクルを促進する上での障害面となっていることは否めない。そこで本研究では、廃棄物溶融スラグをアスファルト用細骨材として利用した場合での、ヒトへの健康リスクに着目する。スラグ利用アスファルトの磨耗粉塵中には当然にスラグが含まれていることから、この粉塵を直接摂取、特に肺から吸引した場合、これはスラグ利用に伴う人への直接リスクとして考慮しなければならない。このときスラグの潜在的摂取量は“吸引可能な粒径以下の磨耗量”×“各粒径でのスラグ寄与率”で計算されることから、磨耗に伴う吸引可能な粉塵量と粉塵中のスラグ寄与率がリスク評価に向けた検討項目となる。なお、現在のところ吸引の可能性を考慮すべき最大の粒径を決定するには至っていないが、降下ばいじんの粒径分布⁴⁾や砂の卷上げ時の粒

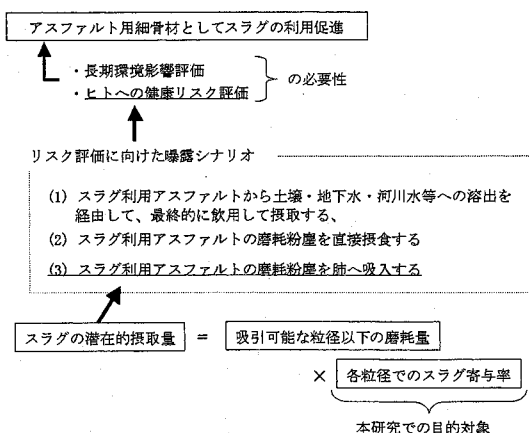


図-1 アスファルト用細骨材への溶融スラグの利用に伴うリスク評価に向けた本研究の位置づけ

径分布⁹⁾を考慮すると0.5mm以下の粒径については吸引の可能性があると考えられる。溶融スラグはガラス質のため天然骨材ほどの硬度を有していないことから磨耗に伴って他の骨材よりも優先的に微粒子化され、吸引リスクがより高い微小粒径の粉塵ほどスラグの寄与率が高くなることが懸念される。そこで本研究では将来的なリスク評価に向けて、磨耗粉塵中のスラグ寄与率にまず着目して検討することとする。粉塵の粒径ごとにスラグ寄与率を推定し、アスファルト作成時のスラグ配合率と比較、評価していくことが本稿での目的である。本研究の位置づけを明確にするため、スラグ利用に伴うリスク評価に向けた本研究の役割を図-1に示す。

2. スラグ寄与率の推定方法

本研究ではスラグ利用アスファルト合材からの粉塵中にどの程度、スラグ由来の粉塵が存在しているか検討するにあたり、二通りの手法でもって推定した。一つ目の手法がX線回折パターンでの SiO_2 ピーク強度を利用した方法である。図-2に示すように、天然骨材（砕石6号および7号）のX線回折パターンでもっとも強度が強いのは石英（ SiO_2 、 $2\theta=26.7^\circ$ ）である。一方、試料スラグはアモルファス状で結晶性の物質をほとんど含まないため、

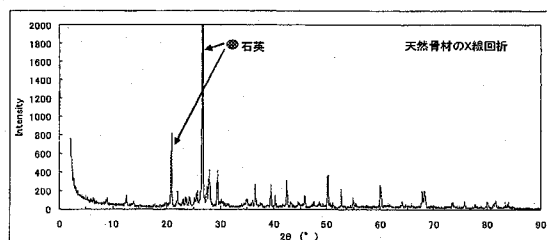


図-2 天然骨材のX線回折パターン

SiO_2 ピークは出現しない。そこで粉塵の SiO_2 ピーク強度から粉塵中のスラグ寄与率を以下の式(1)から推定できる。

$$X_{i,j} = 100 \cdot \left(1 - \frac{C_{i,j}}{A_j} \right) \quad (1)$$

ここに $X_{i,j}$ ：スラグ利用アスファルト合材(i)、粒径(j)の粉塵のスラグ寄与率(%)、 $C_{i,j}$ ：スラグ利用アスファルト合材(i)、粒径(j)の粉塵の SiO_2 ピーク強度(cps)、 A_j ：標準合材、粒径(j)の粉塵の SiO_2 ピーク強度(cps)である。

もう一方の手法は重金属含有量を用いた方法である。天然骨材とスラグでは含有量に大きな差が表れる重金属がある。よってそれらに着目すると、標準アスファルト合材の粉塵中重金属含有量とスラグ利用アスファルト合材の粉塵中重金属含有量に大きな差が現れたとき、粉塵中のスラグ寄与率を式(2)によって推定できる。

$$X_{i,j} = 100 \cdot \left(\frac{A_{i,j} - C_j}{B_i - C} \right) \quad (2)$$

ここに $X_{i,j}$ ：スラグ利用アスファルト合材(i)、粒径(j)の粉塵のスラグ寄与率(%)、 $A_{i,j}$ ：スラグ利用アスファルト合材(i)、粒径(j)の粉塵の重金属濃度(mg/kg)、 C_j ：天然骨材使用アスファルト合材、粒径(j)の粉塵の重金属濃度(mg/kg)、 B_i ：スラグ(i)の重金属濃度(mg/kg)、 C ：天然骨材使用アスファルト合材の平均重金属濃度(mg/kg)である。

3. 実験手法

(1) 細骨材試料

細骨材用試料として一般廃棄物および産業廃棄物の溶融スラグ3種類（スラグA～Cと分類する）を用いた。対照は天然骨材である。スラグAは一般廃棄物焼却灰を溶融したスラグであり、スラグBおよびCはそれぞれ産業廃棄物を溶融処理したスラグである。すべてのスラグの冷却方式は水砕である。

(2) アスファルト合材

アスファルト合材は、表-1に示す配合で作成した。スラグ利用アスファルト合材では骨材のうち粗砂分を代替させたので、骨材中のスラグ利用率は30%である。以後、このスラグ利用率をスラグ配合率と記す。アスファルト合材作成時には、天然骨材およびスラグの配合時に粒度調整を行って粒度分布が各合材で一定となるようにした。各アスファルト合材の骨材粒度分布を図-3に示す。アスファルト合材を15cm x 40cm x 5cmの直方体に成型し、5時間以上養生して合材試料とした。

項目	標準合材	スラグ A 合材	スラグ B 合材	スラグ C 合材
6号碎石	33	33	33	33
7号碎石	22	25	18	25
スクリーニングス	10	7	13	7
粗砂	30	—	—	—
石粉	5	5	6	5
スラグ	—	30	30	30
(アスファルト量)	5.0	5.0	5.0	5.0



磨耗試験はラベリング試験(舗装試験法⁹⁾準拠、往復チェーン式)で行った。アスファルト舗装の磨耗抵抗性能を調査する場合、概ねこの試験法で行われる。チェーン(JIS G 3505 SWRM12)の一端を固定した回転輪を回転させて-10℃の条件下でアスファルト合材供試体をチェーンで叩き(回転速度: 200 rpm, 往復速度: 66 往復/min)、表面を磨耗させて、発生する粉塵を全量採取した。なお、タイヤではなくチェーンを用いた試験であるので、1mm以上の比較的大きい粒子も合材から粉碎、剥離されることがある。よって比較的粒径の大きなものも含めて磨耗粉塵と記していることをここに注記する。有機溶媒によって粉塵中からアスファルトを抽出除去した後に粒度分布を測定した。磨耗時間は通常1.5時間であるが、粉塵採取量が少ないため、スラグBを用いた合材を除き、3時間とした。

粉塵を75 μ m以下、75-150 μ m、150-300 μ m、300-600 μ m、600 μ m-1.0mm、1.0mm以上に分級した上で、各粒径の粉塵を150 μ m以下までボールミルで微粉化した。これを

粉塵の径度	標準合材	スラグ A 合材	スラグ B 合材	スラグ C 合材
1.6μm 以下	8.70	8.97	26.2	11.8
10.8μm 以下	19.5	18.3	51.2	23.0
75μm 以下	35.8	36.6	72.5	36.0
全粒径	94.6	88.8	284	141

メタホウ酸リチウム 3g に対して試料粉末 (150 μ m 以下に粉碎したもの) 0.1~0.3g を白金るつぼ中で良く混合し、オープンにて 800 $^{\circ}$ C 以上に加熱して溶融させた。冷却後、5N 硝酸で溶融物を完全に溶解させ、ICP-AES および ICP-MS で金属元素を測定した。

天然骨材利用アスファルト合材（以下、標準合材）とスラグ利用アスファルト合材（以下、スラグA～C合材）では粉塵量に違いが現れるケースがあった。結果を表2に示す。標準合材とスラグA合材では粉塵量に大きな違いはないが、スラグB、C合材では標準合材と比較して粉塵量が増加していた。ただし、75 μm 以下の粉塵では標準合材、スラグAおよびC合材に大きな違いはない反面、スラグB合材では他の合材と比較して2倍程度、粉塵量が多い。合材作成時に粒度調整を行っていることから、粉塵量の違いは概ねスラグの物理的性状（硬さなど）に起因していると考えられるが、本研究ではスラグそのものの物理的性状を測定していないため、今後の検討を要する。粉塵の累積粒径分布を図4に示す。標準合材とスラグA合材では粉塵量と同様に粒径分布においても違いは現れていない。スラグB合材とスラグC合材は互いに似た粒径分布を示しているが、標準合材やスラグA合材よりも粒径が大きい傾向の分布となっている。

SiO_2 ピーク強度は組成マトリクスの影響を受けるため、まず石英濃度との比例性を確認した。図-5は石英粉末に一定量のガラス粉末を混入し、 $2\theta=26.7^\circ$ の石英ピーク強度を見たものである。混入率0.1のデータを除いて良い直線性を示しており、ピーク強度からガラス質の寄与率（＝スラグ寄与率）を推定することは可能である。異常値に関しては、試料調整時に混ぜ具合が不足していた

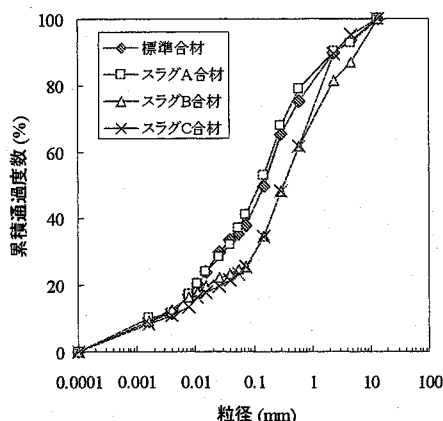


図-4 アスファルト合材磨耗粉塵の粒径分布

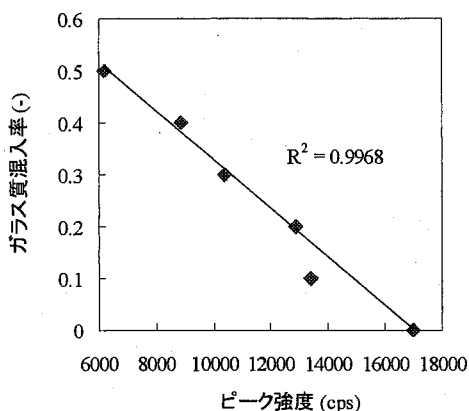


図-5 石英粉末混入率とピーク強度の相関性

ことに起因していると考えられる。

b) SiO_2 ピーク強度のばらつきとピーク強度バランス

各粒径の粉塵に対してXRDによるピーク強度測定を2～3回行い、その結果から各粒径でのスラグ寄与率を推定した。各粒径別のピーク強度を図-6に示す。標準合材からの粉塵をみたとき、粒径によってピーク強度 (X_p) は12000～17000cpsまで大きく異なる結果となった。標準合材の作成に用いた天然骨材そのものがある程度の不均一性を有するため、石英成分の多い骨材が粒径150～300 μm の範囲で相対的に多く磨耗・粉塵化された結果と推察される。各粒径でのピーク強度 (X_p) にその粒径分布割合 (Y_p) を乗じて標準合材粉塵の平均ピーク強度 (加重平均) を求めると約13000cpsである (式3参照)。スラグA～C合材はスラグが30%配合されていることを考えると、各スラグ合材からの粉塵の平均ピーク強度は標準合材での70%にあたる9100cps程度となるはずである。スラグ合材粉塵の平均ピーク強度はそれぞれ表-3の通りであり、先の予想平均ピーク強度 (=9100cps) と比較して予想値からのズレ (表-3ではエラーと表示) は10%

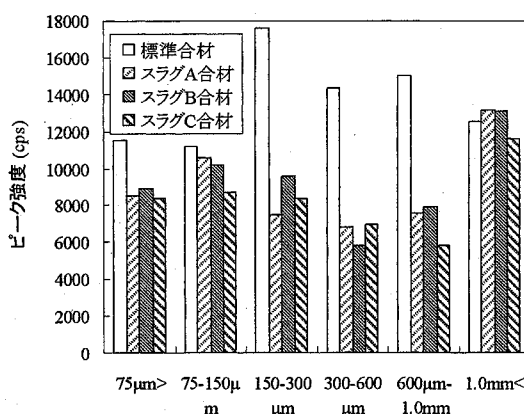


図-6 粒径別粉塵の石英ピーク強度

表-3 各合材からの粉塵の平均ピーク強度と予想値からのズレ (エラー)

項目	標準合材	スラグ A 合材	スラグ B 合材	スラグ C 合材
平均ピーク強度(cps)	13023	9260	10029	9069
予想値(cps)	-	9116		
エラー (%)	-	1.58	10.0	0.51

以内に収まっており、 SiO_2 ピーク強度の測定値は高い信頼性を有すると考える。

$$\mu_i = \sum X_{i,j} \cdot Y_{i,j} \quad (3)$$

ここに μ_i : 合材 (i) の平均ピーク強度 (cps)、 X_{ij} : 合材 (i)、粒径 (j) の粉塵のピーク強度 (cps)、 Y_{ij} : 合材 (i)、粒径 (j) の粉塵の粒径分布割合 (-) である。

c) SiO_2 ピークによるスラグ寄与率の推定

標準合材において粒径により SiO_2 ピークが異なってくることから、標準合材での各粒径別ピーク強度を基準にスラグ寄与率を推定した。推定方法は式1の通りであり、結果を表-4に示す。すべてのスラグ合材からの粉塵に関し、粒径が75 μm 以下のものではスラグ寄与率が配合率 (=30%) と同程度かそれ以下であった。粒径が150 μm ～1.0mmの間にある粉塵では、スラグ寄与率が50～60%を示し、スラグ寄与率が配合率を上回る傾向を示した。1.0mm以上の粒径では、スラグA、B合材からの粉塵に関してスラグ寄与率が負の値を計算上示した。これはこの粒径ではスラグがほとんど存在していないことを意味している。これより SiO_2 ピーク強度による推定法では、粒径が75 μm 以下のものはアスファルト合材作成時のスラグ配合率と同程度かそれ以下のスラグ寄与率となること、150 μm ～1.0mmの粒径ではスラグ寄与率が配合率以上となり、スラグ由来粉塵の濃縮が生じていること、1.0mm以上ではスラグがそれ以下の粒径に破碎されるこ

表-4 SiO₂ ピークから推定した粒径別スラグ寄与率
(単位: %)

粒径	スラグ A 合材	スラグ B 合材	スラグ C 合材
< 75 μ m	25.8	22.5	27.3
75-150 μ m	5.4	9.2	22.3
150-300 μ m	57.4	45.7	52.5
300-600 μ m	52.2	59.4	51.5
600 μ m-1.0mm	49.6	47.2	60.9
1.0mm<	(0)*	(0)*	7.2

* 計算上負の値を示したため、寄与率をゼロとした

とからほとんどスラグ由来粉塵が存在しないことが示唆された。

(3) 重金属濃度によるスラグ寄与率

a) 粒径別の粉塵中の重金属濃度

標準合材およびスラグA～C合材からの磨耗粉塵の粒度分布と粒径別の重金属濃度を表-5に示す。スラグA～Cおよび天然骨材の重金属濃度も併せて表-5に示す。ただし天然骨材はその不均一性から代表的な重金属濃度を分析することが難しいため、標準合材の磨耗粉塵の重金属濃度から逆算して求めた値を用いた。粉塵(スラグA～C合材)の平均重金属濃度(粒度分布による加重平均)とスラグ合材の組成(重金属濃度)は理論上は等しい。そこで実験精度を検討するため、この両者を比較した。両者の比は粉塵として飛散した元素の回収率を意味しており、比が1.0に近いほど元素の回収率が高く、元素のマスバランスが取れていることを示す。結果を図-5に示したとおり、Fe, Mn, Ni, Pb, Znを除いては概ね良い回収率が得られた。次に、粒径による重金属濃度の違いを明示するため、粉塵の平均重金属濃度に対する各粒径での重金属濃度の比を図-7に示す。Al, K, Mg, Mn, Na, Srは合材の種類を問わず各粒径での濃度比は約1.0で一定であるのに対し、Ca, Cr, Cuは標準合材とスラグ合材で違いが現れており、特に粒径が150～600 μ mのスラグ合材粉塵において濃度が相対的に高くなる傾向を示している。なお、Ca, Crでは濃度比の挙動にスラグ合材間で違いは現れていない。Niでは合材の種類を問わず粒径が小さいほど元素濃度が高くなる傾向を示し、反対にZnでは特に標準合材において粒径が大きくなるほど相対的に元素濃度が高くなる傾向を示した。

b) 重金属濃度を用いたスラグ寄与率の推定

標準合材からの粉塵の粒径別重金属濃度をもとに式(2)によってスラグ寄与率を推定した。天然骨材とスラグの重金属濃度が近い値のとき、式(2)から求められるスラグ寄与率は大きな誤差を含みやすい。よって天然骨材とスラグで濃度が大きく異なる元素を推定に用いるこ

とが望ましく、表-6に示した元素の値を用いて各合材の粉塵中のスラグ寄与率を求めた。結果を表-7および図-8に示す。なお、表-7では各元素の値で求めたスラグ寄与率の平均値とその標準偏差も示し、図-8では平均値±標準

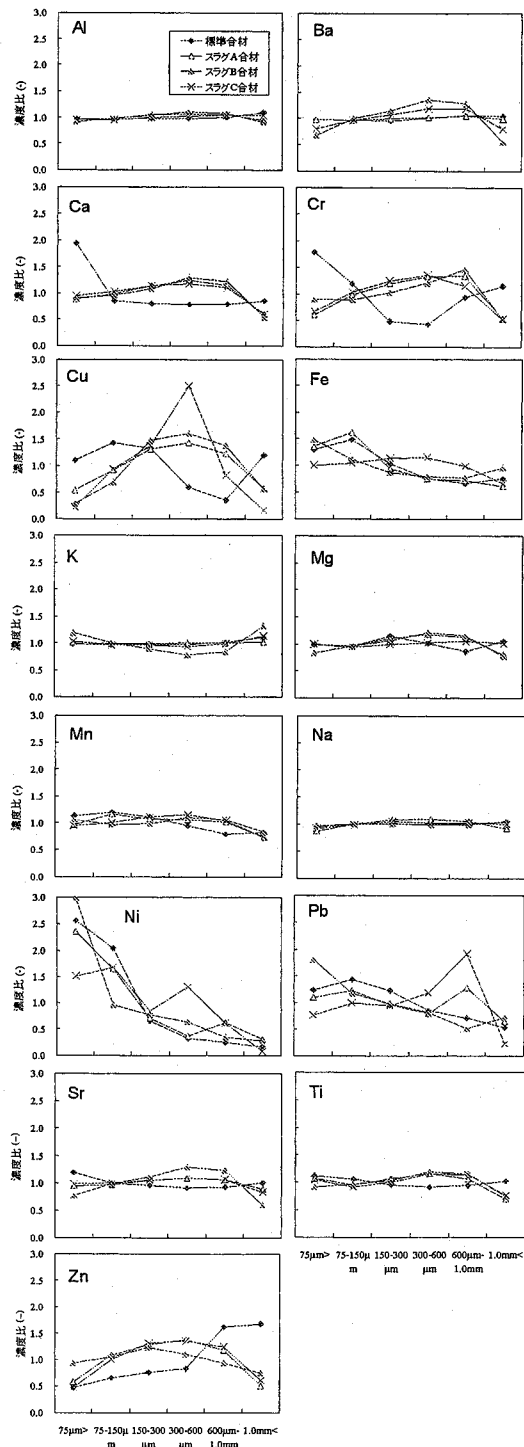


図-7 平均元素濃度に対する各粒径での元素濃度比

表-5 骨材、スラグおよびアスファルト合材からの粉塵の重金属濃度(単位: mg/kg)、粒径分布(単位: %)および粉塵中元素の回収率(単位: %)

骨材/合材	粒径	粒径分布	Al	Ba	Ca	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	Ni	Pb	Sr	Ti	Zn
天然骨材*	-	-	60100	596	25300	50.2	114	30700	38400	7600	427	25900	100	16.1	157	2690	213
スラグ A	-	-	86300	630	175000	1440	2130	26500	33500	19300	967	37600	96.9	220	337	7430	2110
スラグ B	-	-	106000	7170	206000	283	3210	10700	1250	21200	529	18500	99.2	31.1	1150	6300	94.3
スラグ C	-	-	60400	1180	127000	1120	8380	69200	26800	7920	912	26800	285	263	280	4240	1400
標準合材	<75μm	37.8	58500	589	39500	72.4	110	36600	37600	7380	467	24800	187	18.8	177	2920	117
	75-150μm	11.7	58100	576	17300	49.5	148	41800	36800	7160	484	26200	130	21.8	147	2750	160
	150-300μm	15.7	58700	569	16100	33.9	134	29200	36700	8500	455	26200	45.7	18.7	143	2470	185
	300-600μm	10.1	59000	599	16000	29.8	61.8	21400	37200	7490	391	25600	19.7	13.2	137	2350	196
	600μm-1.0mm	3.3	60100	632	15800	33.2	38.6	19100	39200	6420	322	26400	23.9	10.9	138	2440	391
	1.0mm <	21.4	65800	634	17200	35.4	126	21400	42100	7790	338	27400	21.1	8.23	151	2620	412
スラグ A 合材	<75μm	41.2	61800	575	69600	354	439	39300	37600	10000	539	27600	169	41.5	206	4740	425
	75-150μm	11.8	66400	565	78400	575	749	46900	36900	11500	659	32000	174	75.7	213	4250	778
	150-300μm	14.9	70500	585	90000	693	1090	27100	36900	13100	599	34100	113	89.9	232	4750	931
	300-600μm	10.8	71500	599	98500	767	1190	21900	37100	14100	591	34400	72.4	91.0	241	5140	986
	600μm-1.0mm	0.6	70600	611	90700	769	1010	21100	37300	13500	555	34000	65.5	82.9	231	4690	835
	1.0mm <	20.7	63000	590	47600	314	472	18000	38100	9640	405	29400	36.7	44.9	198	3070	370
スラグ B 合材	<75μm	25.5	67200	1850	86200	121	298	22800	32500	11100	376	25100	113	19.0	392	3570	58.8
	75-150μm	9.2	71800	2750	91400	119	739	17200	26500	12700	352	25100	51.5	12.2	513	3770	65.3
	150-300μm	13.5	76300	3180	103000	139	1620	13300	23300	14000	363	24700	50.0	10.2	565	4020	78.6
	300-600μm	13.6	81300	3770	124000	154	1720	12100	20300	16000	396	24700	35.2	8.62	656	4620	68.8
	600μm-1.0mm	0.8	79100	3540	115000	192	1460	12000	21700	15400	383	24400	27.8	5.32	621	4470	58.9
	1.0mm <	37.4	67300	1570	51000	71.6	598	14800	34700	10200	308	25900	21.7	7.62	317	2870	47.9
スラグ C 合材	<75μm	25.5	56700	814	67800	319	686	40100	35100	8230	496	25200	253	41.1	221	4020	320
	75-150μm	9.2	56700	946	73400	481	2900	41800	32700	7810	524	26800	455	88.9	227	3490	666
	150-300μm	13.5	58700	1090	81700	590	4440	45200	32000	8120	592	27900	327	113	241	3890	893
	300-600μm	13.6	60500	1180	85000	634	8130	46100	31700	8520	606	28300	538	161	247	4400	890
	600μm-1.0mm	4.4	61100	1170	79800	543	2530	39500	33400	8700	546	28400	83.9	89.8	240	4380	821
	1.0mm <	33.8	61100	829	43700	244	513	26500	38300	8320	388	27300	40.0	33.9	189	2930	403
粉塵中元素の回収率**																	
スラグ A 合材			0.96	0.96	1.03	1.01	0.92	1.09	1.02	1.00	0.92	1.03	1.24	0.77	1.01	1.06	0.76
スラグ B 合材			0.96	0.89	1.02	0.91	0.80	0.67	1.09	1.03	0.76	1.07	0.53	0.55	0.96	0.94	0.33
スラグ C 合材			0.98	1.21	1.16	1.07	0.94	0.88	1.00	1.07	0.86	1.03	1.55	0.79	1.12	1.16	0.98

* 標準合材の粉塵の平均重金属濃度(粒径による加重平均)から逆算して求めた値である。

** “粉塵の加重平均重金属濃度” / “スラグ合材の平均組成(重金属濃度)” で計算される。元素のマスバランスが取れて回収率が高いほど、1.0に近い値を示す。

表-6 スラグ寄与率の推定に用いた元素

スラグ A 合材	Ca, Cr, Cu, Mg, Mn, Pb, Sr, Ti, Zn
スラグ B 合材	Al, Ba, Ca, Cr, Cu, K, Mg, Sr, Ti
スラグ C 合材	Ca, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, Zn

表-7 重金属濃度から求めた各粒径でのスラグ寄与率(単位: %)

合材	粒径	Al	Ba	Ca	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Pb	Sr	Ti	Zn	平均値	標準偏差
スラグ A	< 75 μ m	-	-	20.2	20.3	16.3	-	-	22.8	13.4	11.1	16.2	38.3	16.2	19.4	7.95
	75-150 μ m	-	-	41.0	37.8	29.8	-	-	37.6	32.4	26.5	36.7	31.7	32.6	34.0	4.58
	150-300 μ m	-	-	49.5	47.4	47.6	-	-	39.5	26.6	35.0	49.6	48.2	39.3	42.5	8.00
	300-600 μ m	-	-	55.2	53.0	55.9	-	-	56.5	37.0	38.3	57.7	58.8	41.6	50.4	8.85
	600 μ m-1.0mm	-	-	50.2	52.9	47.9	-	-	60.8	43.1	35.4	51.6	47.5	23.4	45.9	10.9
	1.0mm <	-	-	20.3	20.0	17.1	-	-	15.8	12.5	18.0	26.2	9.5	(0)*	15.5	7.52
スラグ B	< 75 μ m	19.3	19.2	25.9	20.7	6.1	-	13.8	27.6	-	-	21.7	18.0	-	19.1	6.39
	75-150 μ m	30.2	33.1	41.1	29.9	19.1	-	27.9	40.8	-	-	36.9	28.4	-	31.9	6.98
	150-300 μ m	36.4	39.8	48.1	45.1	48.0	-	36.0	40.2	-	-	42.6	43.2	-	42.2	4.47
	300-600 μ m	49.1	48.3	59.8	53.3	53.5	-	45.5	62.4	-	-	52.3	62.9	-	54.1	6.27
	600 μ m-1.0mm	41.8	44.3	55.2	68.3	45.9	-	47.2	65.6	-	-	48.7	56.3	-	52.6	9.43
	1.0mm <	3.4	14.2	18.7	15.5	15.2	-	20.1	17.9	-	-	16.7	7.0	-	14.3	5.57
スラグ C	< 75 μ m	-	-	27.9	23.1	7.0	9.1	-	-	6.0	9.0	-	-	17.1	14.2	8.64
	75-150 μ m	-	-	55.3	40.4	33.3	(0)*	-	-	8.0	27.1	-	-	42.8	29.5	19.6
	150-300 μ m	-	-	64.6	52.0	52.1	41.5	-	-	28.1	38.2	-	-	59.9	48.1	12.8
	300-600 μ m	-	-	67.9	56.5	97.6	64.1	-	-	44.4	59.6	-	-	58.7	64.1	16.5
	600 μ m-1.0mm	-	-	63.0	47.6	30.1	52.9	-	-	46.1	31.9	-	-	36.4	44.0	11.9
	1.0mm <	-	-	26.0	19.5	4.7	13.2	-	-	10.4	10.4	-	-	(0)*	12.0	8.73

* 計算上負の値を示したため、寄与率をゼロとした。

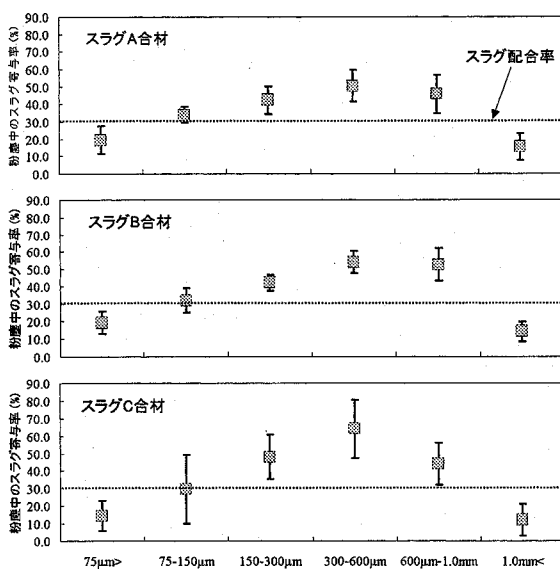


図-8 重金属濃度から求めた各粒径でのスラグ寄与率

準偏差をバーとして示している。Fe, Mn, Ni, Pb, Znに関しては測定値から求めた平均濃度と配合組成(重金属濃度)の差が大きなケースもあり(表-5を参照)、注意を要する。各粒径でのスラグ寄与率の推定値は元素によって多少異なってくるものの、スラグ合材の種類に関わらず一定の傾向を示した(図-8を参照)。吸引リスクが最も高くなる粒径が75 μ m以下のものではスラグ寄与率がアスファルト合材作成時のスラグ配合率(=30%)以下であり、それより粒径が大きくなる150 μ m~1.0mmの粉塵ではスラグ寄与率が元素間平均値で約30~60%程度と、スラグ寄与率が配合率を上回る傾向を示した。粒径が1.0mm以上では12~15%のスラグ寄与率(元素間平均値)であり、配合率を下回っている。

重金属濃度による推定方法ではスラグ合材中のスラグが磨耗・粉塵化されるとき、スラグ粉塵の重金属濃度は粒径によらず均一であると仮定して計算している。しかしスラグ中の重金属元素はガラス相に均一に存在するわけではなく、酸化物やシリカ化合物(spinel, meliliteなど)を形成して微視的にはある程度不均一に散在している⁷⁾。よって実際には粒径によって濃度が異なっている元素もあると考えられ、このためにスラグ寄与率の推定値に元素間である程度のばらつきを生じさせていると推察される。例えば水谷ら^{8,9)}は溶融スラグを2mm以下に粉砕したとき、粒径によって重金属濃度が異なる場合があることを報告している。

(3) 2つの推定方法による推定値の比較

磨耗粉塵中のスラグ寄与率に関して、SiO₂ピーク強度による推定値と重金属濃度による推定値を比較したもの

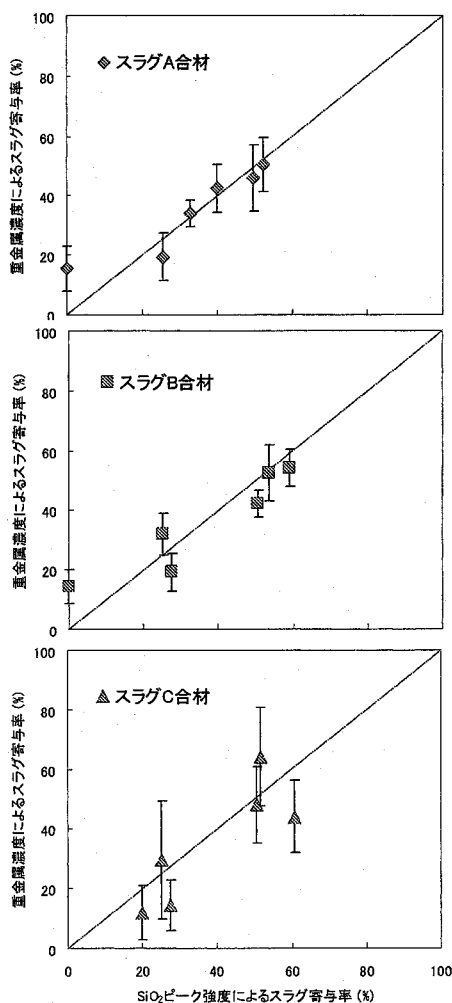


図-9 SiO₂ピーク強度と重金属濃度によるスラグ寄与率の比較

を図-9に示す。重金属濃度によるスラグ寄与率は、それぞれの対象元素濃度を用いて推定した値の元素間平均値であり、各プロットのバーは標準偏差を示す。両者による推定結果はスラグC合材の場合に違いがやや現れているものの概ね良い一致を示しており、スラグ寄与率の推定が高い信頼性を有していると考えられる。スラグC合材では、特にFe, Mnの重金属濃度による推定値がSiO₂ピーク強度による推定値と差を示した。Fe, Mnは元素マスのバランスがやや悪いことから実験精度がこの一因と考えられるが、スラグ粉塵のFe(Mn)濃度が粒径に依存して均一でない可能性も原因として推察される。

これより、上記の結果と図-3および図-4により、次のようにまとめられる。骨材の粒度分布を一致させたアスファルト合材(図-3を参照)を用いて磨耗試験を行った結果、生じた磨耗粉塵の粒度分布も骨材の種類を問わず合材間で大きな差は表れなかった(図-4を参照)。特に標

準合材とスラグA合材では良く一致している。ただしスラグと天然骨材が同じように磨耗・微粒子化しているわけではなく、スラグの方が天然骨材よりもむしろ相対的に微粒子化しづらい。これは背景で述べた予測と大きく異なっている。吸引リスクが相対的に高くなる、粒径が75 μm 以下のものでは、粉塵中のスラグ寄与率がアスファルト合材作成時のスラグ配合率と同程度かそれより低くなっている。よって、スラグ利用アスファルト合材からの磨耗粉塵（特に75 μm 以下の微粒子）の重金属濃度をアスファルト合材組成（重金属濃度）と等しいとすることは、粉塵の重金属濃度を過大評価する恐れがある。

5. 結論

スラグを骨材として利用したアスファルトからの磨耗粉塵に関し、 SiO_2 ピーク強度と重金属元素濃度を用いて粉塵中のスラグ寄与率を推定した。両者の手法において、特に吸引リスクが高くなる粒径が75 μm 以下のものに関しては粉塵中のスラグ寄与率がアスファルト合材作成時のスラグ配合率と同程度かそれ以下であり、粒径が150 μm ～1.0mmの間にある粉塵ではスラグ寄与率が配合率より高くなる傾向を示すことが共通して得られた。このことはスラグが天然骨材よりも磨耗によって相対的に微粒子化しづらいことを示している。スラグ利用アスファルト合材からの磨耗粉塵の重金属濃度をアスファルト合材の組成（重金属濃度）と等しいとすると、特に粒径の小さい粉塵において重金属濃度の過大評価につながる可能性がある。よって磨耗粉塵の吸引リスクを検討する上で、粉塵の重金属濃度は適切に分析、評価されねばならない。今後の課題として、破碎・磨耗メカニズム面での検討が吸引リスク評価とともに必要である。

参考文献

- 1) 環境省：一般廃棄物処理事業実態調査（平成17年度実績），2007
- 2) Koda K.: Experimental pavement using household waste slag, Waste Management, Vol.16, No.5/6, pp. 461-474, 1996
- 3) 菊池幸男, 阿波俊一：灰溶融スラグを配合した再生アスファルト混合物の評価報告，清掃技法, No. 5, pp. 75-83, 2005
- 4) 加藤秀平：スパイクタイヤ問題にみる沿道環境の現状と対策，公害と対策, Vol. 20, No. 12, pp. 1151-1157, 1984
- 5) 池田茂：砂丘気象の研究（第6報）砂丘地に於ける風速と飛砂量との関係，砂丘研究, Vol. 5, No. 1, pp. 1-15, 1958
- 6) 日本道路協会：舗装試験法便覧, Vol. 3, pp. 17-38, 1996
- 7) Saffarzadeh A., Shimaoka T., Motomura Y. and Watanabe K: Chemical and mineralogical evaluation of slag products derived from the pyrolysis/melting treatment of MSW, Waste Management, Vol. 26, No. 12, pp. 1443-1452, 2006
- 8) 水谷聡, 渡辺信久, 高月紘：環境化学討論会予稿集, Vol. 14, pp. 786-787, 2005
- 9) Mizutani S., Watanabe N., Sakai S., Takatsuki H.: Influence of Particle Size Preparation of MSW Incineration Residues on Heavy Metal Leaching Behavior in Leaching Tests, Environmental Sciences, Vol. 13, No. 6, pp. 363-370, 2006

(2007. 5. 25受付)

Composition share of MSW slag in abrasion dust from asphalt concrete that contains MSW slag as aggregates

Fumitake TAKAHASHI¹, Akiko KIDA², Takayuki SHIMAOKA¹

¹Dept. of Urban and Environmental Engineering, Graduate School of Engineering, Kyushu University

²Research Center for Material Cycles and Waste Management, National Institute for Environmental Studies

Composition share of municipal solid waste (MSW) slag in abrasion dust from asphalt concrete, which consists of natural aggregates, MSW slag and asphalt binder, was estimated by two methods. One method is based on different intensities of X-ray diffraction for quartz between natural aggregates and MSW slag. The other is based on different concentration of heavy metals among these materials. In the case of fine abrasion dust whose diameter was less than 75 μm , both methods estimated that composition share of slag-derived material in the dust is nearly equal or less than that of slag in asphalt concrete. In contrast, opposite results were estimated by both methods for 150

μm to 1.0 mm abrasion dust. This results suggested that MSW slag used in asphalt concrete seemed to be relatively hard to be milled finely compared to natural aggregates.