

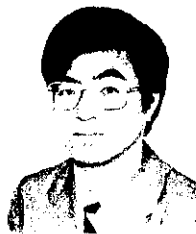
下水汚泥溶融スラグをリサイクル使用した 舗道材「カワプロムエース®」の開発*

川崎製鉄技報
27 (1995) 1, 19-26

KAWAPROM ACE® Pavement Block Manufactured by Recycling Fused Sewage Slag



高橋 弘
Hiroshi Takahashi
川崎材(株) 建材事業部 部長



小林 秀夫
Hideo Kobayashi
鉄鋼企画営業本部 建材事業開発部 主査 (課長)



日向 博久
Hirohisa Hinata
エンジニアリング事業本部 環境エンジニアリング部 主任部員 (課長)

要旨

下水汚泥溶融スラグのリサイクル使用を目的として、粘土、長石および珪石で構成される原料に10～40%の下水汚泥溶融スラグを配合し、成形・焼成したレンガ舗道材「カワプロムエース®」を開発した。焼成時の共融点特性と気孔の状態の制御により、磁器質にドレーン吸収させたスラグに含まれる黒色ガラスおよびリン-鉄系化合物の色調を利用して銀黒色の斑点を出し天然石風の高級感のある表情を作り出すとともに、気孔を利用して雨水を大地に返す機能を持たせている。また、敷設施工試験で重金属類の追跡調査を行い溶出のないことを確認し、公的試験機関の計量証明を受けた自然に優しい景観材料である。溶融スラグを40%含有するものはエコマーク商品の認定を受けた。

Synopsis:

To aim at recycling the fused sewage slag, the pavement block KAWAPROM ACE® is developed by forming and firing the porcelain made from clay, feldspar and quartz, and by mixing 10 to 40% of the fused sewage slag. The fused sewage slag is absorbed or contained in the state of glass by controlling the eutectic point (minimum melting point) of the mixture and the condition of pores existed. And the black tone of color of glass and the iron-phosphide alloy included in the fused sewage slag mark silver-black color spots on the pavement block, looking like a high-grade design of the natural stone surface, and KAWAPROM ACE also has the function of building up ground water. By the follow-up of the test road surface laying KAWAPROM ACE, it was certified by the public assay service that the heavy metal group elements were not detected in the extracted solution. Therefore KAWAPROM ACE makes the pavement which gives gentler views to the street. KAWAPROM ACE containing 40% and over of fused sewage slag was approved of ECO-Mark Goods which were authorized as the useful recycle-goods for an ecological system by Japan Environment Association.

1 緒 言

近年、下水道の整備・普及に伴い終末処理場で発生する汚泥は増加の一途をたどっている。

発生する汚泥の75.7%は埋立処分されており、最終処分場の確保は汚泥発生が増大に追いつかず狭隘化してきている。また再生資源の利用の促進に関する法律いわゆる「リサイクル法」の施行、環境基本法の整備が進められているなか、平成8年度以降海面埋立は法律上困難となることが決定し（1994年9月21日閣議決定中央環境審議会答申、9月26日公布官報）下水汚泥のリサイクル資源化が緊急の課題となっている。

こういった背景による必要性にせまられ、焼却灰の更なる減容化による埋立地の寿命延長と灰の中に含まれる重金属類などの有害物質の溶出防止の観点から、プラズマ溶融などによる焼却灰の溶融スラグ化に自治体などの期待が高まっている。

本稿では、下水汚泥溶融スラグをリサイクル使用したレンガ舗道

材を開発し環境保全につなげることを目的に、川崎炉材㈱で開発した「カワプロムエース®」について材料設計、製造方法、品質特性等の概要を述べる。

2 舗道材の動向と開発経緯

溶融スラグの利用の状況は、路盤材に用いられる程度で高付加価値化あるいは有効利用²⁾には至っていない。一方、都市インフラの整備は社会的要請である。舗道においては、雨水の排水対策や夏場の高温化対策の必要性が叫ばれている。

リサイクル舗道材が試験的に一部地方自治体で製造されているが、表情が単調で強度や凍結融解特性の面で問題があり、一般市販はされていない。また、溶融スラグや焼却灰を一部配合したものは市販されているが、多くは出回っていない。この理由として、強度およびデザイン的に赤レンガの域を出ないことが挙げられる。また、業界動向ではタイル・建築用レンガメーカー、耐火物のメーカーおよび焼却設備・溶融設備メーカーがリサイクル品の試作・PRを行っているが、一般市場には多くは出回っておらず統計もない。しかも、各舗道材メーカーは自社生産するより輸入して販売する傾向

* 平成7年3月31日原稿受付

が強く、リサイクルれんがとの取組姿勢は低調である。

このような社会的環境のなかで、川崎炉材(株)が1987年に経営の多角化として建材事業進出を検討したとき、これをエコビジネスとして育成したいと考え各種の副産物をリサイクル利用した舗道材を製造販売することにし、1991年4月に高炉水砕スラグを25%リサイクル利用した半透水性舗道材「NEW マグセラ®」³⁾の製造に着手した。その後、火力発電所で発生する石炭灰を利用した緻密質2層構造の舗道材「セレス®」³⁾の技術導入を行い、さらに改良を重ね1991年11月から本格生産を開始した。このような経験を踏まえて、定形耐火れんが製造技術をベースに自社オリジナル製品を開発することとし、次の5項目を開発の狙いとした。

- (1) 下水汚泥溶融スラグの有効利用：磁器組成にガラス状態で吸収させ、リサイクル率を高くする。
- (2) 透水機能による雨水の涵養：20 μm 以下の気孔を多く有する組織にする。
- (3) 重金属類の溶出がないこと(二次公害防止)：スラグをガラス化させ重金属類を封じ込める。
- (4) 表面デザインの発現(高付加価値化)：スラグの色調をレンガ表面に斑点として発現させデザインの多様化を図る。
- (5) メンテナンスフリー(高強度・耐汚染性)：強度の高い利点を生かし車道に使用する。

そして、舗道材表面に表情を与える原料としてリン-鉄系化合物を含有する黒色ガラスである下水汚泥溶融スラグに着目して、1989年日本下水道事業団兵庫西エースセンターの稼働と同時に、同事業団の委託を受けて下水汚泥溶融スラグの調査を行い、1990年に表情豊かな天然石風の肌を有する舗道材「カワプロムエース」を開発した。

この製品については、日本下水道事業団の支援を受け開発品の品質試験を行い、重金属類の溶出のないことを確認したうえ、有孔タイプの舗道材が播磨科学公園都市の駐車場に兵庫県企業庁により採用された。さらに、川崎炉材(株)はこの路面の追跡調査を2年間行い、水質汚濁防止法第3条第1項に規定する排出基準(排出基準を定める総理府令)、特定廃棄物の埋立基準方法(兵庫県要綱)および中央公害対策審議会土壌汚染環境基準(平成5年環境庁告示19号)に対して問題のないことを確認した。この間、琵琶湖の浚渫底土の活用や各都市の溶融スラグ(千葉市中央浄化センター旋回溶融スラグ、千葉市北谷津焼却灰プラズマ溶融スラグ)の活用を行い適用範囲の拡大を図ってきた。

3 カワプロムエースの構成

3.1 下水汚泥溶融スラグ

溶融スラグの原料となる汚泥ケーキは石灰ケーキと高分子ケーキがあり、溶融炉に投入されるとき両者の比率や石灰および砕石の比率、さらに溶融炉の種類と燃料の種類によりスラグの性質は大きく変わる。

一般に、溶融スラグはFig. 1のCaO-Al₂O₃-SiO₂系3成分系状態図⁴⁾に示した平行四辺形の領域内にあり、溶けやすくするため3成分共融点1265°C付近の組成、すなわちCaO/SiO₂=1あたりになるよう成分調整しているが、処理方法により石灰系汚泥は2CaO・SiO₂領域、高分子系汚泥はCaO・SiO₂領域のスラグになりやすい。

また、この3成分のほかFe₂O₃とP₂O₅が主成分として存在し、微量のK₂O、Na₂Oなどを含有し、実際の融点はさらに低下し1050~1150°Cになる。特に、Feは金属単体、リン化鉄、低次酸

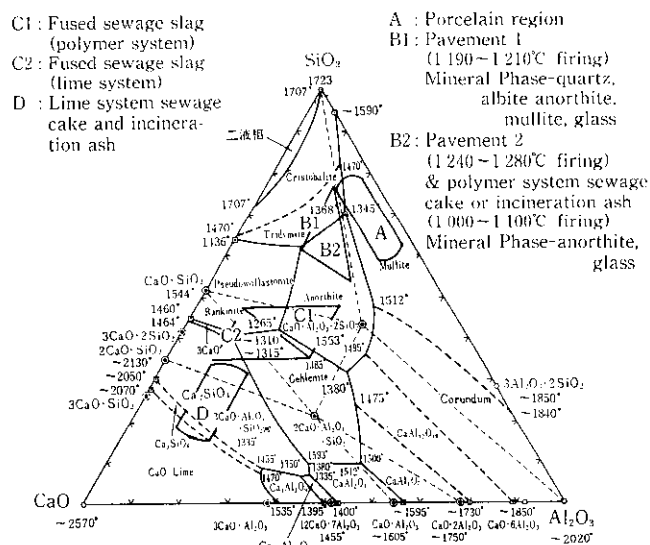


Fig. 1 The region of the composition of slags, raw sewage cake, porcelain and pavements in the CaO-Al₂O₃-SiO₂ three component phase diagram⁴⁾

化物の形でガラス中に巻き込まれたり、或いは着磁成分として8~15%存在し、それぞれの状態の量比は溶融方法により異なる。このFe-P系化合物が舗道材にうるみのある黒点を発生し表面にデザインを与えてくれる。このことが、溶融スラグを舗道材の材料として使用可能にした大きな理由である。

また、溶融スラグ中の重金属類はガラスを構成するSiO₂およびP₂O₅ネットワーク内に封じ込められ溶出が防止されている。したがって、舗道材の製造にあたっては、スラグをできるだけガラス状態で磁器組成中にドレーン吸収(高温で融液の状態のスラグをスポンジ状の磁器組成ベース中に吸収させ、ガラス状態のまま冷却固定すること)させるのがポイントである⁵⁾。

3.2 磁器組成

磁器組成はFig. 1のCaO-Al₂O₃-SiO₂系3成分系状態図⁴⁾のA領域にあり、試作れんが舗道材の組成はB1、B2の三角形の領域に入るわけであるが、実際は1170°Cの3成分共融組成の融液を粒界に少量生成したスラグと磁器組成の不均質混合体である。

なお、高分子系の汚泥と焼却灰はB2組成を含むanorthite領域にあり、100%組成でもれんがになりやすい組成になっている。一方、石灰系の汚泥と焼却灰の組成は2CaO・SiO₂および3CaO・SiO₂を含むCの領域にあり、焼成工程でCaOの消石灰化(膨張)現象や、2CaO・SiO₂のダスティング(粉化)現象を伴い、れんがに成りにくい範囲にある。

高分子系の汚泥と焼却灰には石灰石を加え、石灰系の汚泥と焼却灰には砕石や珪石を添加しCaO/SiO₂=1に塩基度調整して、溶けやすくして溶融スラグにしている。石灰系汚泥と高分子系汚泥の2種混合法でCaO/SiO₂=1にしているところもあるが、実際の溶融スラグの組成は、原料ケーキの組成比率と砕石、石灰の調合割合により、C1 (CaO・SiO₂-2CaO・Al₂O₃・SiO₂-CaO・Al₂O₃・SiO₂系)およびC2 (CaO・SiO₂-2CaO・SiO₂-2CaO・Al₂O₃・SiO₂系)の領域にある。

3.3 スラグと磁器組成の共融反応

目的の品質の舗道材の製造に際し、よく把握しておく必要のある

Table 1 Classifications of factors and characteristics of pavement

1st factor	2nd factor	3rd factor	Properties of pavement
Design factors (Manufacturing conditions)	Melting characteristics (Characterization of glass state)	Capillary characteristics (Condition of inner structure)	Performance on road surface
Brand of raw materials: Fused sewage slag, clay, feldspar, quartz	Contact angle	Pore size	Strength
Mixing ratio	Eutectic point	Pore shape	Solubility of heavy metal elements in water
Grain size (distribution)	Viscosity	Porosity	Absorption of water (Permeability)
Pressing condition	Crystallization (co-existing state of glass-crystal)		Design
Firing conditions: Heating schedule, cooling rate, top temperature, soaking time, atmosphere, temperature gradient			

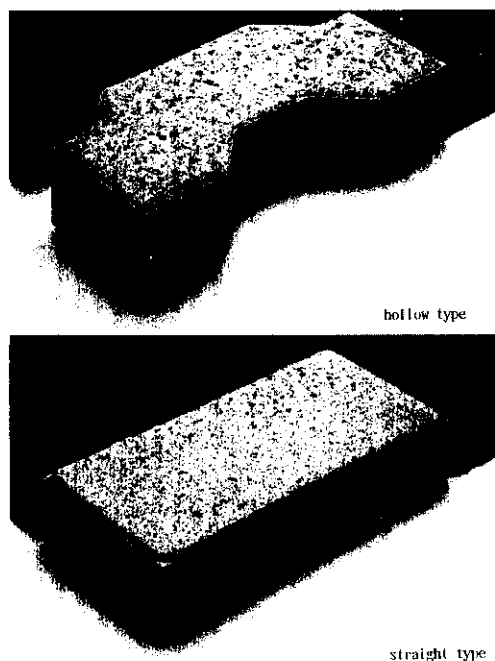


Photo 1 KAWAPROM ACE

要因特性の関係を **Table 1** に挙げる。具体的に、製造条件を決定するとき重要となるのが、磁器用原料とスラグの共融特性と気孔の状態制御である。なぜなら、汚泥の成分が地域ごと、発生場所ごとに異なり、これを安定に固定する原料を各製造工場は近くの山から入手するためである。したがって、この基礎要因の適正レベルを把握しておく、製造工場ごとに適切な条件設定が容易にできることになる。

これらの要因のレベルが異なると、出来上がった舗道材の表情がどう変わるかを **Photo 1** に示す。有孔タイプ^{6,7)}は、石灰系溶融スラグを 10%リサイクルしたもので、吹き出している黒い点は Fe-P 系の化合物である。ベースにまだら模様を出しているのがスラグ系の融液である。この黒色斑点がデザイン的に多様化し高級感を与え

ている。写真下の並型形状は高分子スラグを 30%リサイクル使用したものである。酸化の程度がよく進み金属鉄量が少なく表面もやや均一で単調になっているが、スラグを結晶化させずに固定しておりリサイクル率を高くできる利点があり、今後積極的にスラグ鉄の利用で表情の多様化が図れる可能性がある。

4 製造方法

Fig. 2 に舗道材の製造工程図を示す。粒度調整された珪石、長石と粘土に下水汚泥溶融スラグを加えパルプ廃液をバインダーとして用い、ロール付きのミキサーで混練し配合を作る。2 層構造の舗道材の場合は表層用配合に顔料を加えたり、基層（下層）にその他の廃棄物例えば石炭灰、都市ごみ焼却灰、産業副産物等を加える場合もある。混練された調合物をプレス成形や押し出し成形機で所定の形状に成形し、これをさやの中に入れたり、直接焼成台車に積みあげて乾燥後トンネルキルンで 1 150~1 280℃の温度で焼成され製品となる。このとき、下水汚泥溶融スラグを吸収させる磁器組成を構成する珪石、長石、粘土の原料銘柄とスラグの性状、添加量および焼成温度によりれんがの表面表情が変わり、さらに焼成雰囲気により酸化鉄の発色が変化し窯変する。したがって、原料銘柄ごとに調合割合や焼成条件の検討が必要となる。

Fig. 3 に三角ダイヤグラム⁴⁾で珪石・長石・粘土系の磁器組成域を示す。溶融スラグの固定のためには soft porcelain の B 領域がよい。また気孔の制御には、融液の生成量のコントロールが重要であるが、ベースとなる磁器組成構成原料の粒度配合も重要である。**Fig. 4** の斜線部領域が一般的な範囲であるが、汚れ問題を考慮すると、より fine（微粉）の領域が良好で 20 μm の気孔を増加させることが必要である。

Table 2 に石灰系スラグを比較的珪石成分の多い磁器組成 (**Fig. 3** の B 2 領域)の中に混入させて 1 250℃で焼成した場合の品質特性とスラグ量の関係を示す。スラグ 30%以上添加かられんがは変形をはじめ次第に発泡するようになる。この例では、10~20%スラグ添加が適量で、デザインの点でも優れ、強度も向上しており高付加価値化に成功した例である。さらに、スラグのリサイクル率を向上させるにはスラグの溶融温度に近い比較的低い温度で焼成する必要がある。

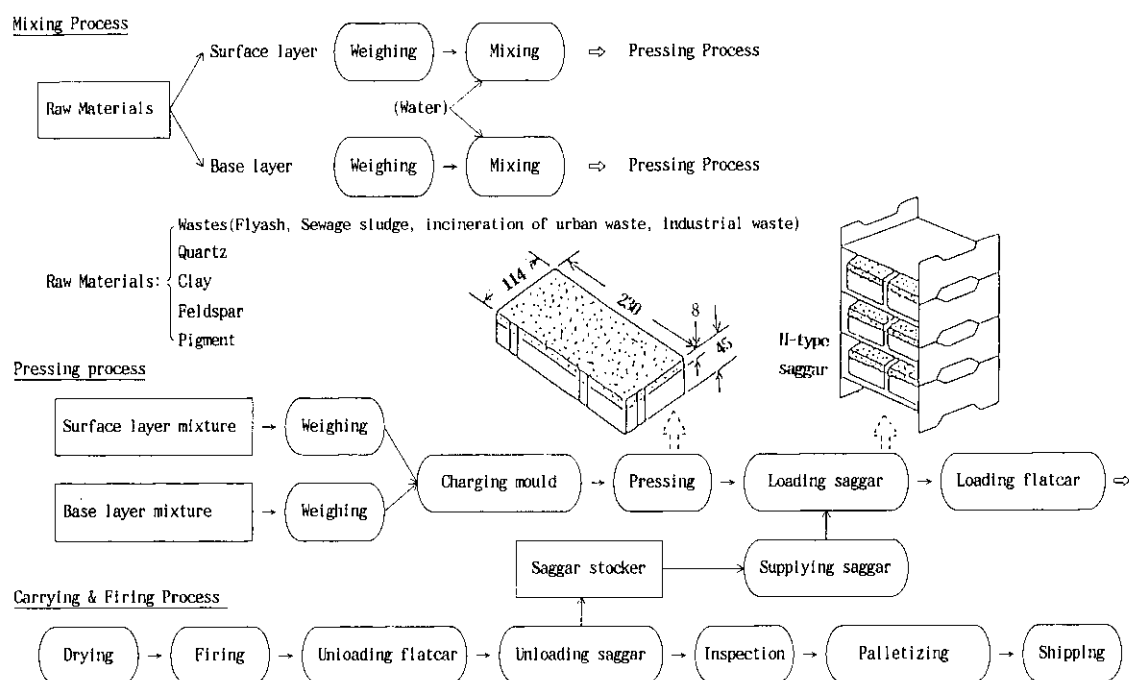


Fig. 2 Flow chart of manufacturing process of pavement

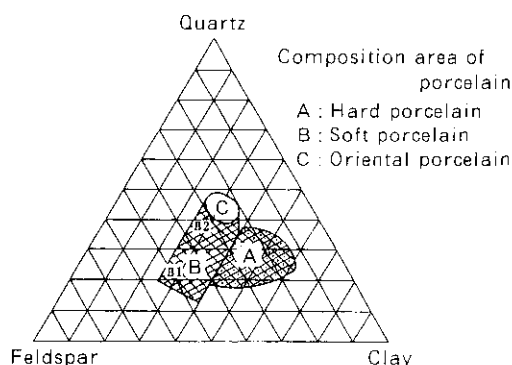
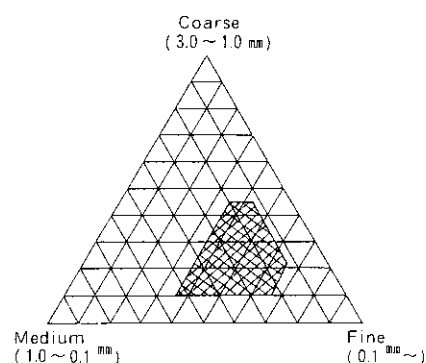
Fig. 3 Porcelain range in the diagram of clay-feldspar-quartz⁴⁾

Fig. 4 Particle distribution range for stable forming

Table 2 Effect of slag content on the physical properties of pavement block sintered at 1250 °C

Sample No.	0	1	2	3	4	5	6
Slag contents (%)	0	5	10	20	30	40	50
Appearance after sintering	OK	OK	OK	OK	def.	def.&foa.	def.&foa.
Linear change after firing (%)	-2.9	-2.4	-2.2	-0.9	-0.8	-0.4	-0.4
Absorption of water (%)	7.6	7.0	6.1	6.2	6.8	—	—
Compressive strength (MN/m ²)	60.9	60.9	60.9	60.9	60.9	—	—
Bending strength (MN/m ²)	6.0	8.3	9.3	9.8	8.5	—	—

Base mixture : Silica porcelain (B2) def. : deformation foa. : foaming

る。Table 3 に石灰系スラグを比較的長石成分の多い原料（陶石）を用いた磁器組成（Fig.3 の B1 領域）の中に混入させて 1200℃ で焼成した場合の品質特性とスラグ量の関係を示す。スラグ 50% 以上添加かられんがは発泡傾向を示し焼成変化率がプラスの値になる。この例では、30～40% スラグ添加が適量であるが、色調はスラグ量の増加にしたがい黄色系になりデザインのやや単調になるの

で、顔料を加えて濃茶ないし黒色系にしておちついた色に仕上げている。

しかし各地の製造工場でこのような調合で製造を行おうとすると、特定の原料を遠隔の工場に運搬することになり運賃が高くなるため、調合のアレンジを行う必要がある。またその工場の焼成炉の常時運転温度がそれぞれ異なる。このため、れんが表面の表情は著

Table 3 Effect of slag content on the physical properties of pavement block sintered at 1200 °C

Sample No.	0	1	2	3	4	5	6
Slag contents (%)	0	10	20	30	40	50	60
Appearance after sintering	OK	OK	OK	OK	OK	foa.	def.&foa.
Linear change after firing (%)	0.2	0.1	0.1	0.2	-0.1	±0	±0
Absorption of water (%)	5.6	5.1	5.1	4.8	4.7	4.5	4.7
Compressive strength (MN/m ²)	49.4	57.2	61.1	67.1	68.7	59.2	55.8
Bending strength (MN/m ²)	5.9	6.6	7.4	9.3	8.9	7.3	8.6

Base mixture : Silica and feldspar porcelain (B1) foa. : foaming def. : deformation

しく変化する。たとえば、Fig.3のA領域の粘土系の原料（白土）にスラグを加えて1300℃で焼成した場合、スラグが高粘性のガラスに変化して嵩を増大し表面に吹き出し商品価値を損なうとともに、焼成中に相互付着が起こり歩留を低下させる。また焼成温度を下げてリサイクル率を高くすると、石灰系スラグは再結晶化し表面に吹き出し一部2CaO・SiO₂のα'-γ転移によるグスティングを起こす場合がある。こうなると重金属類はガラスからの析出結晶の粒子境界に絞り出され、使用時の雨水による溶出の心配が出てくる。したがって、各製造工場の環境条件にしたがってリサイクルするスラグ銘柄の選定、粒度および添加量等にたいしてきめこまかい管理が必要である。

5 カワプロムエースの品質特性

5.1 種類

形状と寸法については、Photo 1に示すように普通タイプ（長さ230 mm×幅114 mm、標準厚45 mm）を基本形状として、れんが側面に2 mmのスペーサーを付けたもの（ダボ付）とダボ無し品がある。さらに、普通タイプの1/2形状の役物タイプ（114 mm正方形）や2倍型の230 mm正方形のものを取りそろえている。特殊形状品として点字タイプや敷設すると植栽用の孔ができる有孔タイプがある。厚さはオプションで30~60 mmのものを任意に選ぶことができる。

色は顔料無添加の白系（WT）と、酸化鉄系顔料を用いて茶系の濃淡2色（LB, DB）の発色をさせたものと、赤系顔料や黒系顔料による（RD, BK）の5色を標準色として準備しているが、製造工場ごとに色調が異なるため実物見本により色決めをする必要がある。さらに、窯変により色調は微妙に変化するので、窯変を敷設路面の表情の演出に活用することも考慮すべきである。

このように、種類は形状と色調で決定され色調が決まれば下水汚泥溶融スラグの種類と使用量および製造工場が決まる。スラグのリサイクル量は製造工場ごとに、かつ、色ごとに変化させており10%、30%、40%の3段階を採用している、とくにスラグを40%使用したACE-(40%)-SWシリーズは、(財)日本環境協会のエコマーク商品No.42「廃材を使用したタイルおよびブロック」の認定基準（1992年12月11日改定）を満たしており、審査の結果1994年6月24日にエコマーク商品の認定を受けた（認定番号 第94042001号）。

5.2 一般的性質とコンクリート二次製品との強度比較

典型的なカワプロムエースの品質例をTable 4に示す。試験方法および規格はJIS規格（陶磁器質タイルJIS A 5209-1987、耐火レ

Table 4 Technical data of KAKWAPROM ACE

Physical properties	Specification	Typical data
Absorption of water (%)	< 13	3 ~ 7
Compressive strength (MN/m ²)	> 58.8	73.5 ~ 93.2
Bending strength (MN/m ²)	> 4.9	7.8 ~ 10.3
Floor slipperiness (BPN)	> 45	73 ~ 77
Permeability (mm/h)	(20)	14 ~ 20
Frost resistance	Normal	Normal

ンガJIS R 2202-1987, JIS R 1250-199) に準拠した。吸水率3~7%で降雨量換算14~20 mm/hの透水性を有しているのが特徴で、その他に路面の性質として必要なノンスリップ性、耐凍結融解特性をそなえている⁹⁾。曲げ強度はコンクリートの2倍でそれだけ舗道材の厚さをインターロッキングブロックより30%薄くすることができる。

使用実績として3年半になるが割れ等による損傷は全く発生しておらず、またトラック車道（A交通道路⁹⁾）に敷設して丸一年経過したが、一枚も割れておらず実用上全く問題がない。

また、アスファルト部との取り付け部では、2~3枚幅のれんがの裏面をセメントペーストで固定し、かつモルタル目地でつなぎをとることが必要である。しかし、れんがとアスファルトとの間にコンクリートや緑石等のコンクリート二次製品でニュートラルゾーンを10~15 cm程度設けた場合と、れんがを直接取り付け付けた場合の比較を行ったところ、ニュートラルゾーンのコンクリートから破損が進行した。車両のタイヤの衝撃を舗道材が直接受けるように施工の方が優れていることが判った。同様の比較試験から、駐車場の区画線でもコンクリート緑石より白色のカワプロムエースのほうが優れることが判明した。

5.3 溶出特性

溶融スラグおよびこれを使用したれんが舗道材からの重金属類の溶出の調査を行った。

Table 5に溶出試験結果を示す。ここでは、サンプルを0.5~5 mmに粉砕してpH 5.8の溶液に10%混合し、この混合液500 mlを振とう機で常温常圧6時間振とう（振幅4~5 cm、振動数200 rpm）し抽出した溶液中の重金属類の分析結果を示す（環境庁告示13号の方法）。この測定は第三者公的機関による分析証明で、「Mn, Cu, Znを除く重金属類は分析精度以下検出せず」との計量証明を取り、二次公害が無いことを確認して商品としている。

なお、1991年から2年間、敷設路面間にPhoto 2に示す雨水採取容器を埋め込み、雨水の分析および周辺土の分析を行い、溶出の

Table 5 Dissolving test of heavy metal elements from KAWAPROM ACE and fused slag (mg/l)

Item	Measured value		Regulation limit ^a	Soil pollution environment standard ^c
	KAWAPROM ACE	Fused slag		
Cd	< 0.003	< 0.003	0.1	below 0.01
Pb	< 0.05	< 0.05	0.1	below 0.1
As	< 0.004	< 0.004	0.1	below 0.05
CN	< 0.01	< 0.01	1	15ppm ^d
Cr ⁶⁺	< 0.01	< 0.01	0.5	not detected
Organic P	< 0.02	< 0.02	1	below 0.05
T-Hg	< 0.0005	< 0.0005	0.005	not detected
Mn	< 0.02	< 0.01	10 ^b	below 0.0005
Cu	0.01	< 0.01	3 ^b	125ppm ^e
Zn	0.01	< 0.01	5 ^b	

Public assay service : Hyogo Assay Center Co., Ltd.

Measuring Method : Notification No.13 of the Environment Agency

^aDischarge regulation limit : The Water Pollution Prevention Act Article 3, Paragraph 1.^bFill up standard of specified waste materials (the outline of Hyogo Pref. Government)

Mn, Cu and Zn mean the soluble metal element or chemical compounds.

^cSoil pollution environment standard :

Notification No.46 of the Environment Agency in 1991.

Notification No.19 of the Environment Agency in 1993.

^dSoil concentration of As by soil pollution environment standard^eSoil concentration of Cu by soil pollution environment standard

<="less than": below accuracy of detection

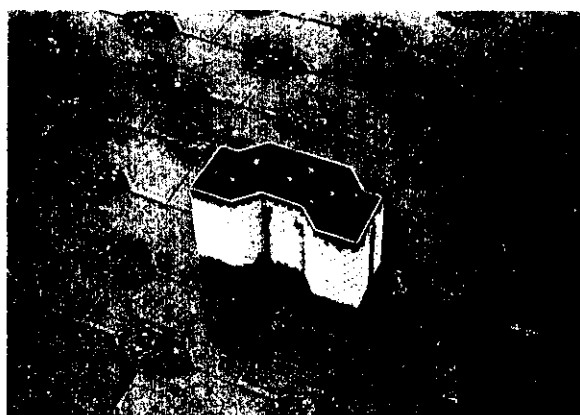


Photo 2 Sampling vessel for permeating rain water

ないことを確認して日本下水道事業団に報告した。

5.4 透水性(吸水性)と汚れ特性

次に、透水性と汚れの関係について説明する。一般に、透水性ブロックはインターロッキング協会の規格として、透水係数 1×10^{-2} cm/s と規定されている。この値は降雨量換算 360 mm/h の透水能に相当し、1 mm 程度の貫通気孔を多く持った 5~3 mm 粒の単味充填構造となる。しかし、透水性を上げれば水も透すけれど汚れ物

質も吸い込み、目詰まりを起こして不透水性になってしまうという矛盾もはらんでいる。しかも目詰まりを起こしはじめると汚れという現象につながる。川崎材料㈱では、以下で述べるように、汚れのメカニズムの考察と気孔率を変えた汚染実験に基づき、カワプロムエースでは 20 μ m 以下の気孔が全気孔の 70% 以上占めるよう制御した構造を採用し、透水性としては降雨量換算 14~20 mm/h を確保するようにした。この結果目詰まりすることなく、かつ汚れは大きく目立たず水を吸い続けるという好結果を得ている。

5.4.1 汚れのメカニズム

Fig. 5 に汚れのメカニズムを示す。汚染物質粒子のメディアン径を関東ロームの粒度 4 μ m 以下に設定し、被汚染側すなわち舗道材の表面に存在する傷、亀裂、穴および凹凸の寸法との関係で汚染の状態を示した。この図から汚れの特徴をまとめると次のようである。

- (1) 形態の肉眼による識別限界は 20 μ m である。これ以下の気孔、亀裂、傷および穴は見えない。
- (2) 20 μ m 以下の気孔へは、4 μ m 以上の汚染粒子は気孔自身のフィルター作用で内部に入らず、表面に堆積して表面を着色する。
- (3) 4~0.5 μ m の粒子も単独では沈降速度が遅く、最密充填構造を形成し難く、ほとんどは表面に堆積した 4 μ m 以上の粒子と共に表面に止まり表面を着色する。
- (4) 0.5 μ m 以下の粒子はブラウン運動をしており、堆積しない。例えば、墨汁を染みこませても流水や雨水にさらされると、流出し色は消えていく。

物体の表面に色、形の異なる異物(汚染物質)、または傷が局部的に存在し肉眼で認識された場合汚れと呼んでいる。汚染物質の寸法が 20 μ m 以下のものは形態的に判別できないが、大量に存在した場合色として認識される。したがって、20 μ m 以下の異物が大量に存在する場合それらの供給を絶ち、それを除去すれば元に戻るようになる。この除去作業にあたって、表面に単純に乗っている汚染物質は通常簡単にとれるが、付着、吸着あるいは収着していたり、化学反応による変質となると簡単にとれなくなり化学的クリーニングを行わなければならない。

一番問題になるのが目詰まり現象で、これが起きると透水機能は低下するし、汚れの除去はまず不可能となる。目詰まりが起こるのは 20 μ m 以上の穴や、亀裂への汚染物質の充填が起こった場合で、透水機能は急速に低下し、かつその傷の存在量に応じ汚れが目立ってくる。現象的であるが、20 μ m 以下の気孔を有するれんがは目詰まりはあまり起こらず吸水機能を維持することが観測されている。そこで平均粒径が 4 μ m の関東ロームを使った汚染実験を行った¹⁰⁾。

5.4.2 汚染実験

吸水率と気孔径分布の異なる 3 種(Pottery, Brick, Stone)のれんが舗道材を準備した。それぞれの気孔径分布パターンを Fig. 6 に示す。

Pottery ware(陶器質舗道材)は半透水性の舗道材で、20 μ m 以上の気孔が大半を占めている。Brick(れんが舗道材)としたものは 20 μ m 以下の気孔が全気孔の 70% 以上存在する吸水タイプの舗道材である。Stone ware(石器質舗道材)は磁器組成の不透水性れんがの舗道材で、気孔寸法は 85% 以上が 20 μ m 以下である。

Table 6 に汚染物質としての関東ロームの性質を示す。4 μ m 以下の粒子が 64% 以上、平均粒径 2.38 μ m、色は黒褐色、化学組成は酸化鉄の多い粘土状の土である。これを含水率 50% のスラリーにしてれんがの 1/2 の部分に塗布し、自然乾燥 1 日後流水で 15 分

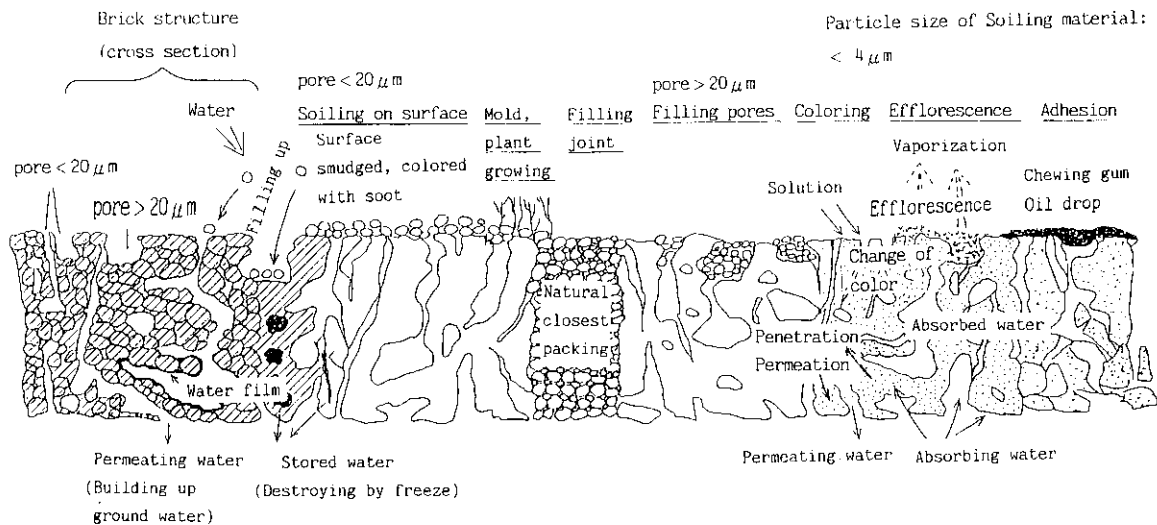


Fig. 5 Mechanisms of soiling surface and filling pore

Table 6 Particle size distribution of Kanto-loam soil

Particle size	(μm)	~1	1~2	2~4	4~6	6~8	8~10	10~20	20~45	45~74	74~
Distribution	(%)	25.3	20.1	18.8	2.1	4.6	1.1	0.9	8.1	9.8	9.2

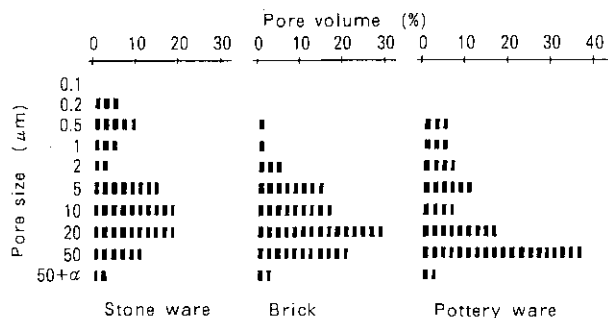


Fig. 6 Distribution of pore diameter of the pavements

間水洗いし、乾燥後カラーコンピュータ（色度計）で未汚染部との色差を測定した¹¹⁾。

Photo 3は汚染実験後の写真である。上部半分が汚染後の変色状態である。これから一つの結論として、汚染物質の色に近い色の舗道材を選択することが汚れ対策の一つであると言える。また気孔寸法が大きくなればなるほどよく汚れることがわかる。

次に、気孔の量と気孔の寸法と汚染の進行程度の関係について見ると、**Fig. 7**は20 μm 以上の気孔の量と色差値の関係をプロットしたものであるが、相関係数 $r=0.7$ で有意差がみとめられ気孔量の増加につれて汚染が進むことを示している。これに対し、**Fig. 8**は20 μm 以下の気孔量について汚れの傾向をプロットしたものであるが、色差値は変化していない。このことは、20 μm が肉眼の識別限界であるばかりでなく、4 μm 以下の微細な汚染物質も気孔内に入っていないことを示唆している。

4 μm の粒子は20 μm 以下の気孔内へは簡単に入らないことが現象的に認められているが、この理由は4 μm 以下の粒子は水中での沈降速度が遅く、凝集したり表面のフィルター作用で他の大き

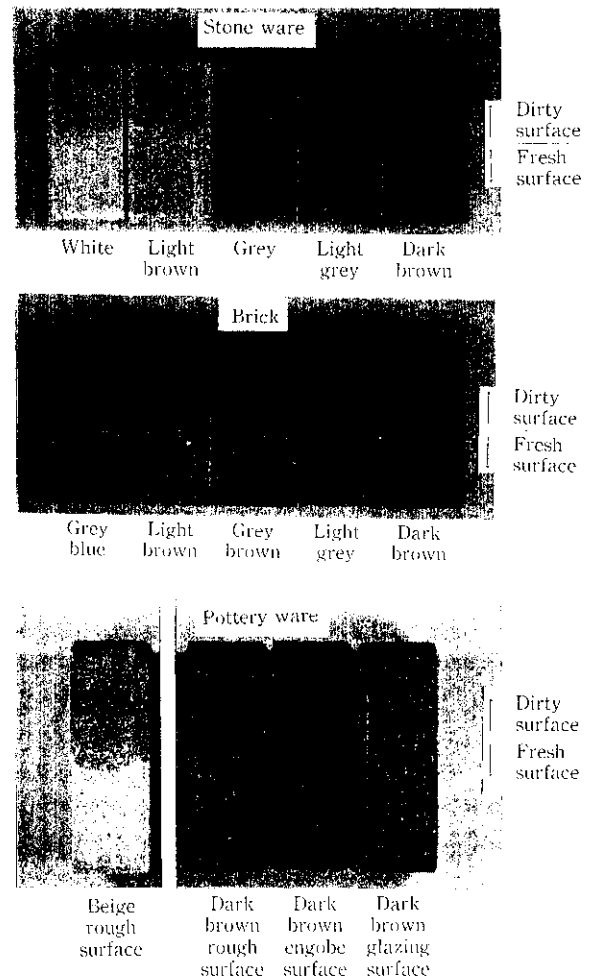


Photo 3 Appearance of the pavements after soiling test

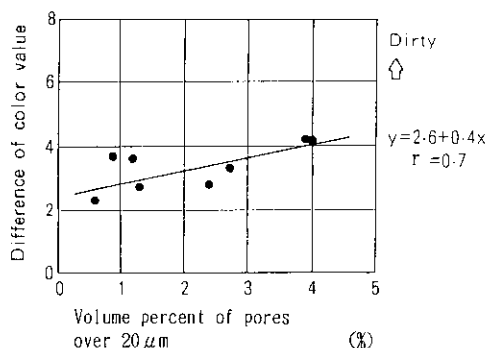


Fig. 7 Effects of volume of pores over 20 μm on the difference of color value before and after soiling

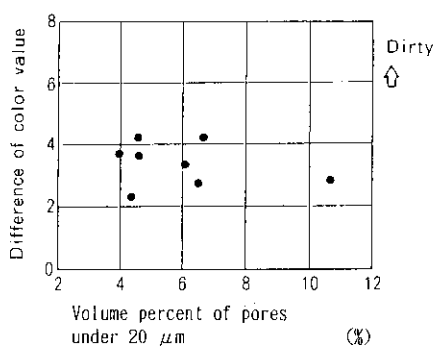


Fig. 8 Effects of volume of pores under 20 μm on the difference of color value before and after soiling

な粒子と共に表面に一時滞留するだけで簡単に除去されていくものと思われる。典型的な透水性れんがの関東ロームによる汚染実験も行ったが、表面の凹凸は目詰まりによりフラットになっておりほとんど水を透す機能は無くなっている。しかしよく見ると、目詰まりは表面に近いごく薄い凹凸層で起こっており内部にはあまり入っていないことがわかった。

6 結 言

カワブロムエース®は陶磁器原料に、廃棄物問題に悩む下水汚泥を溶融スラグ化して原料として使用し、環境保護と廃棄物の再資源化に役立つ自然に優しい舗道れんがが景観材である。

その特徴は以下のとおりである。

- (1) 粘土・長石・珪石等で構成する陶磁器原料に下水汚泥溶融スラグを10～40%配合し成形後高温焼成して製造する。
- (2) スラグ成分中の黒色ガラス質やリン-鉄化合物の状態の変化を利用してれんがに天然石風の表情を与えている。
- (3) 陶磁器原料の成分と焼成時の融液生成量を調整し気孔の状態を制御して、スラグを磁器質にドレーン吸収させることにより、スラグ中に含まれる重金属の溶出防止を図っている。
- (4) れんがの組織に20 μm 以下の気孔を付与して透水性、汚染防止およびノンスリップ性の機能を持たせ安全で快適な歩行性を実現している。
- (5) 高温焼成によりれんがを磁器質にすることで、強度や耐磨耗性に優れ、車道に敷設してもコンクリート二次製品と比較して割れ難く、また凍結融解による損傷がおこらず寒冷地での使用に適している。
- (6) 溶融スラグ40%以上含有するものはエコマーク商品の認定を受けた。

以上のように本製品はその優れた性能によりお客様に好評を博しているが、今後さらに、リサイクル使用する廃棄物等の種類を拡げ、安定に固定する量を増し、自然での調和を図ったリサイクル舗道材の提案をおこなっていききたい。

すなわち、以上報告した技術を用いて、各種焼却灰や各種産業廃棄物のリサイクルが図れるが、この時焼却灰等は単純に添加するだけでなく、造粒子やコーティング粒子あるいは焼結粒子や粒度の均一なプラズマ溶融水砕スラグ粒子として使用し、リサイクル率を高めた透水性商品の開発を目指したい。さらに、このような優れた性質をもつ舗道材は適切な敷設工法で路面に使用された時、始めてその性能を発揮するものであるため、路盤構造の調査と測定を行い使用条件に適合した工法を確立しておくことも必要であろう。

なお、川崎炉材(株)は兵庫県知事より「カワブロムエース®」をビジネスとして成立させた実績等を認められ、平成6年度エコビジネス振興賞を受賞したことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 塩路勝久、植松龍二：「下水汚泥の有効利用の現状と課題」、第7回下水汚泥の有効利用に関するセミナー講演概要集、下水道汚泥資源利用協議会、Oct.(1994)、1
- 2) 下水道汚泥資源利用協議会：「下水汚泥の建設資材利用マニュアル(案)」(1991)
- 3) 高橋 弘：「セラミック舗道材 セレス®, NEW マグセラ®」、川崎製鉄技報、24(1992)3、87～89
- 4) 素木洋一：「工業用陶磁器」、(1974)、[技報堂]
- 5) 藤田敏進、高橋 弘：「舗道材カワブロムエース®の開発」、川崎炉材技報、No.24(1991)、50～56
- 6) 日本下水道事業団：「2次製品及び同製品の標準図(案)」(1993)、[(財)下水道業務管理センター]、図面番号24
- 7) 日本下水道事業団：「下水道施設標準図(詳細)土木・建築設備編」、平成6年版、図番A-01床：溶融スラグレンガ
- 8) 土木学会編：「街路の景観設計」、(1987)、[技報堂出版]
- 9) 飯島 尚：「技術士を目指して(建設部門)」、第7巻 道路、(1992)、[山海堂]
- 10) 原田和彦、高橋 弘：「環境による汚染の少ない透水性カラー舗道材の開発」、川崎炉材技報、No.22(1991)、54～59
- 11) 後藤和昌、岸良和宏：「屋外路面のよごれ感の評価法に関する研究(II)」、日本建築学会学術講演会概要集、(1990)、725