

# 下水道汚泥焼却灰の煉瓦への活用

福永 均 加藤 勝正 浅井 邦雄 服部 金司

Utilization of Incinerated Ash of Sewage Sludge for Common Bricks  
by

Hitoshi FUKUNAGA, Katsumasa KATO, Kunio ASAI and Kinji HATTORI

下水道汚泥焼却灰、石炭灰など公共性の高い廃棄物を活用して、新しい煉瓦素材の開発を試みた。煉瓦土に焼却灰を添加すると機械的強度の増加、吸水率の低下など物性は向上するが、多量の添加においては押出成形の困難さや白華現象が生ずる。このため、白華防止に対し、成形水分を減少させることが有効な手段であり、半乾式プレス成形法による新素材の開発を実施した。その結果、煉瓦土70%、焼却灰20%、石炭灰（クリンカーアッシュ）10%の調合物を成形水分10%、成形圧力19.6MPaで成形し、1100℃で焼成した素地は煉瓦土単味に比べて、圧縮強さが大きく、吸水率が少ないなど物性が向上するとともに、白華も生じない。また色調は還元焼成した煉瓦製品と極めて類似し、表面に細かな凹凸を有するなど従来製品にない新しいテクスチャの素材が開発できた。

## 1. まえがき

現在、愛知県においては県下7流域で下水道の整備が進められている。浄化センターの建設にともない汚泥の発生量が増大することが予想される。平成10年度には約130t/日の汚泥が発生し、そのうち焼却灰は約7t/日発生すると予想されており、その有効利用が課題となっている。一方、煉瓦企業においては消費者ニーズの多様化に伴って、新しいテクスチャーを有する煉瓦素材の開発が必要となっている。このような背景より下水道汚泥

焼却灰や石炭灰など公共性の高い廃棄物を用いて、従来製品にない色調やテクスチャーを有する煉瓦素材の研究を行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 使用原料

#### 2.1.1 下水道汚泥焼却灰

使用した下水道汚泥焼却灰は愛知県豊川浄化センターから発生する脱水汚泥ケーキを800℃で焼却処理した残

表1 使用原料の化学組成 (%)

試料名	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Ig. loss
豊川焼成灰	27.6	19.0	5.94	27.1	0.81	9.87	4.67	0.73	2.23	1.92
煉瓦土	66.0	17.8	4.32	—	0.70	1.02	0.63	0.98	2.42	6.15

表2 使用原料の粒度分布 (%)

試料名	粒子径 (μm)					
	< 5	5~10	10~20	20~45	45~250	250<
豊川焼成灰	5.7	16.1	31.9	26.4	19.9	—
煉瓦土	17.0	16.7	16.2	13.3	27.5	9.3

渣であり、1～2t/日排出される。また煉瓦土は主に三河粘土を原料としている。表1に下水道汚泥焼却灰及び煉瓦土の化学組成を示す。

焼却灰の特徴は $P_2O_5$ を多量に含むことである。煉瓦土に比べて $Fe_2O_3$ や $CaO$ の含有量が多く、 $SiO_2$ は少ない。鉱物組成としては $\alpha$ -石英、長石及び鉄化合物（ヘマタイト、マグネタイト）である。

また表2に焼却灰及び煉瓦土の粒度分布を示す。焼却灰は煉瓦土に比べて、 $5\mu m$ 以下の粒子が少なく、 $250\mu m$ 以上の粗粒子は含まれず、 $5\sim 45\mu m$ のシルト分と $45\sim 250\mu m$ の細砂からなっている。

耐火度はSK04a ( $1020^\circ C$ )であり、煉瓦土に比べて低い。そのため、 $1100^\circ C$ で焼成すると表面はガラス化する。熱膨張曲線から判断すると $800^\circ C$ まではほぼ直線的に膨張し、それ以降急激に収縮し、焼固する。 $\alpha$ -石英の量が少ないため、 $573^\circ C$ 付近の大きな膨張は見受けられない。

### 2.1.2 石炭灰（クリンカーアッシュ）

使用した石炭灰は、中部電力（株）碧南火力発電所から排出されたクリンカーアッシュを $5mm$ 以下に分級したもので、粒度分布は $0.25mm$ 以下14.9%、 $0.25\sim 0.5mm$  6.7%、 $0.5\sim 1mm$  14.2%、 $1\sim 1.68mm$  25.3%、 $1.68\sim 5mm$  38.9%である。クリンカーアッシュ<sup>1)</sup>は石炭燃焼時にボイラーの炉底に落下採取されるもので、フライアッシュに比べて粗粒であり、ほとんどが非晶質のものである。なお排出量は年間約5万トンで、現在は敷地内に廃棄処分されており、有効利用はされていない。

## 2.2 押出成形による活用試験

煉瓦土と焼却灰を配合し、成形に必要な水分を加え、逆流式混合混練機を用いて混練し、坏土を作製した。この坏土を真空式押出成形機により $150\times 50\times 15mm$ の大きさの試験体に成形した。乾燥後、電気炉で $1050$ 、 $1100$ 、 $1150^\circ C$ （昇温速度 $60^\circ C/h$ 、最高温度で1時間保持）の各温度で焼成した。表3に調合割合を示す。

また、実用炉による焼成試験を行うため、試験体を煉

表3 押出成形素地の調合割合 (%)

試料名	煉瓦土	焼却灰
X 0	100	0
X 3	97	3
X 5	95	5
X 10	90	10
X 20	80	20

瓦用トンネル窯にいれ、酸化及び還元焼成し、吸水率、曲げ強さ等の物性を測定した。

## 2.3 プレス成形による活用試験

白華防止に対し、成形水分を減少させることが有効な手段であり、半乾式プレス成形法による活用試験を実施した。煉瓦土及び焼却灰を配合したものに石炭灰（クリンカーアッシュ）を加え、成形水分及び成形圧力を変化させ、一軸加圧成形法により成形した。乾燥及び焼成後、圧縮強さ、ヤング率等種々の物性を測定した。表4に調合割合を示す。

表4 プレス成形素地の調合割合 (%)

試料名	煉瓦土	焼却灰	石炭灰
FA0	100	0	0
FA10	90	10	0
FA20	80	20	0
FA30	70	30	0
FA40	60	40	0

## 2.4 ヤング率の測定

試験体中に超音波を発信し、伝播する音速からヤング率を算出する超音波パルス法により測定した。測定周波数は $100kHz$ の縦波を用い、ヤング率（縦弾性係数） $E$ は次式より算出した。

$$E = 9.8V_p^2 \cdot \rho / g \times 10^5 \text{ (MPa)}$$

$V_p$  : 縦波速度(km/s)、 $\rho$  : かさ密度(g/cm<sup>3</sup>)

$g$  : 重力加速度 (980cm/s<sup>2</sup>)

## 2.5 色調の測定

測色色差計を用いて、試験体及び煉瓦製品の色調を測定した。測定値は3箇所の平均で、表示はJIS Z 8729のCIE LABに従った。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 押出成形による活用試験

#### 3.1.1 焼却灰添加素地の物性

図1～3に焼却灰添加による物性値の変化を示す。

煉瓦土に焼却灰を添加すると、乾燥収縮率は低下し、乾燥曲げ強さは10%添加までは、ほとんど変わらないが、20%添加では低下する。焼成後の物性値は、焼成温度が低い時はあまり変化はないが、 $1100^\circ C$ 以上の焼成では、影響が顕著に現れる。焼却灰の添加量の増加に伴い、収縮率及び曲げ強さが増加し、吸水率は低下する。この原因として、焼成温度が高くなると、焼却灰中のリンやア

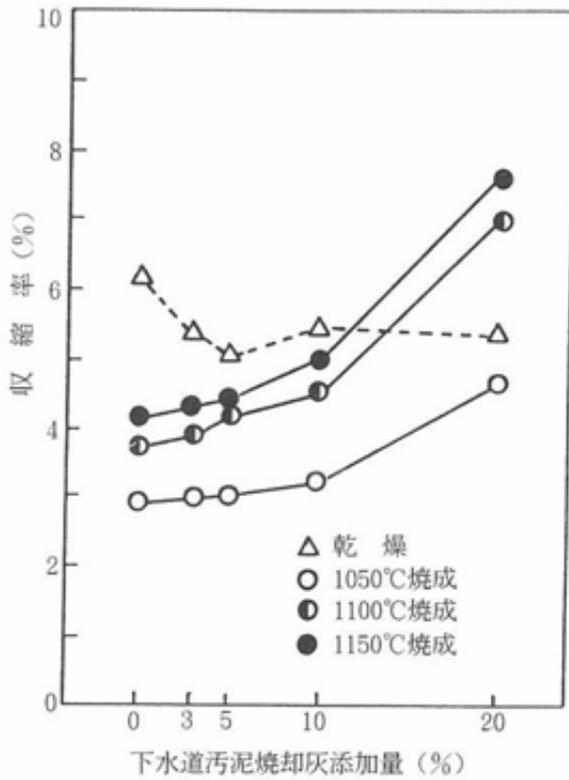


図1 焼却灰添加による収縮率の変化

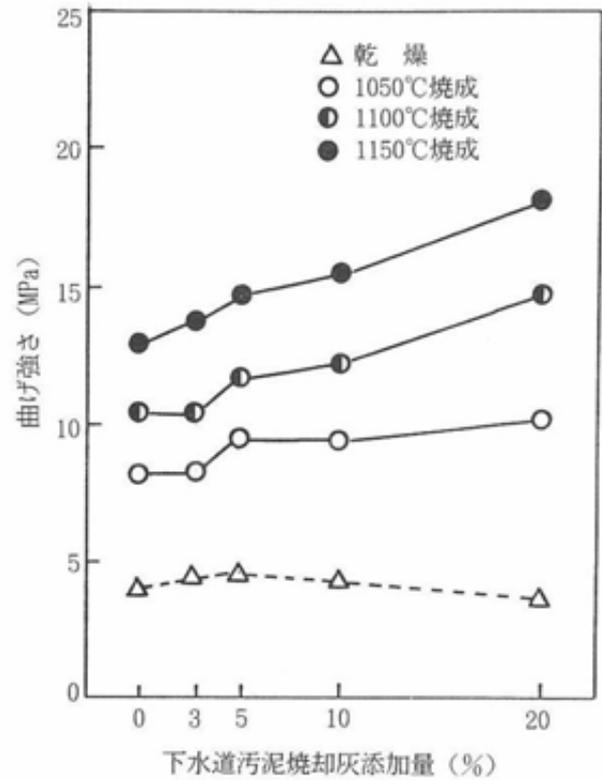


図3 焼却灰添加による曲げ強さの変化

ルカリ成分が融剤として働き、ガラス化が促進されるためと考えられる。

### 3.1.2 白華及び表面性状

焼却灰の添加量が5%以上になると、焼成後の素地表面に白い斑点の白華が生じた。表5に焼却灰に含まれる水溶性イオンの測定結果を示す。

焼却灰は通常の粘土に比べて水溶性イオンが極めて多く、硫酸イオンが一般粘土の100倍近く入っていることから、白華は硫酸塩とりわけ硫酸カルシウム（石膏）が主原因と考えられる。この白華を実体顕微鏡で観察した結果、結晶の大きさは50~100 $\mu$ mで、焼成温度が高くなると素地組成と反応し、黒ずんでくる。さらに高温になるとガラス化し光沢を帯びる。一般に物性面での影響はないが、素地表面を汚染するなど、商品価値は低下する。

表5 使用原料の水溶性イオン (ppm)

試料名	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
焼却灰	424	830	1285	2284	8995
煉瓦土	39	31	19	15	93

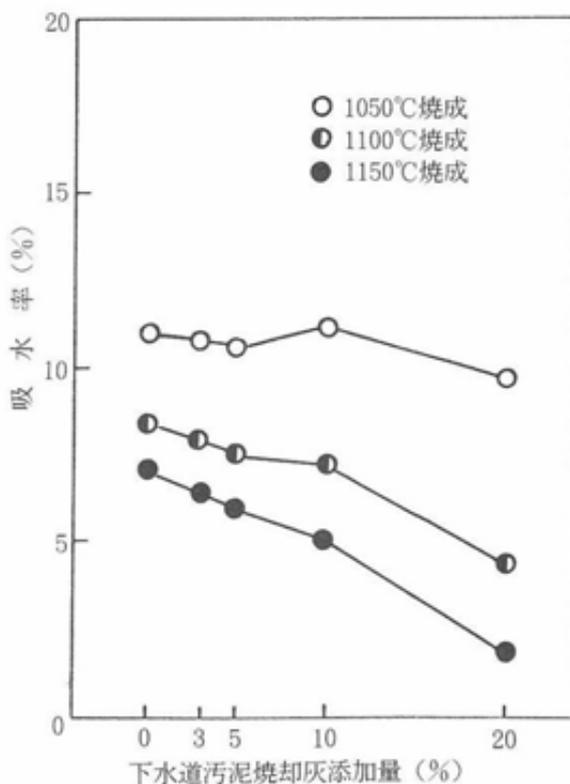


図2 焼却灰添加による吸水率の変化

表6 実用炉焼成による試験体の物性

試料名	酸化焼成			還元焼成		
	収縮率 (%)	曲げ強さ (MPa)	吸水率 (%)	収縮率 (%)	曲げ強さ (MPa)	吸水率 (%)
X 0	3.9	11.9	7.5	4.8	16.5	2.2
X 3	4.1	13.2	6.9	4.9	18.4	1.7
X 5	4.4	14.3	6.3	5.1	17.4	1.4
X 10	5.3	15.0	5.5	5.7	15.7	1.2
X 20	7.2	17.4	3.0	7.2	19.8	1.0

## 3.1.3 実用炉による焼成試験

試験体を煉瓦用トンネル窯により酸化及び還元焼成した。表6に結果を示す。

酸化焼成においては、電気炉で焼成した場合とまったく同じ傾向を示し、焼却灰の添加量が増加するに伴って、曲げ強さが増加し、吸水率が低下する。しかし、還元焼成では焼却灰の添加量が増加するに伴って、吸水率は低下するが、曲げ強さについては過焼により素地組織が発泡し、曲げ強さが低下した試験体もあった。

## 3.2 プレス成形による活用試験

## 3.2.1 成形水分

煉瓦土80%、焼却灰20%のX20素地を用いて、成形水分10、15及び20%、成形圧力9.8MPa及び19.6MPaで6cm立方体の試験体をプレス成形した。表7に試験体の物性値を示す。

成形水分が多くなるほど圧縮強さが減少し、吸水率が多くなる。また図4に示すようにプレス方向面と水平面とではヤング率の差が生ずる。特に水分量が多くなると

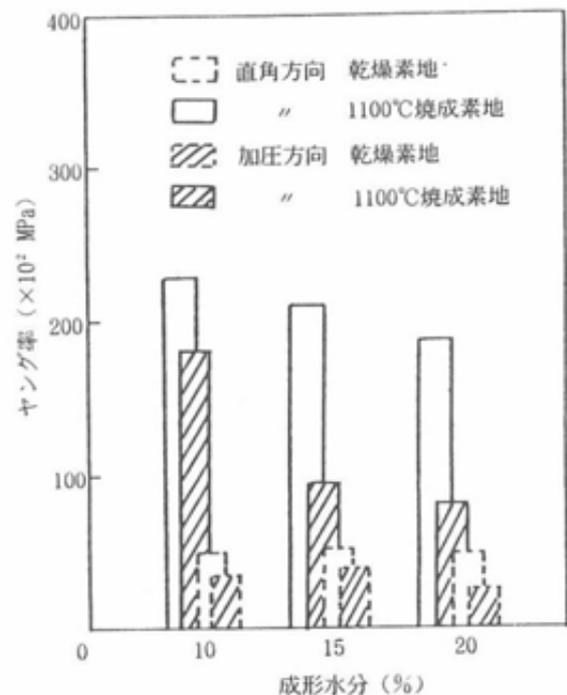


図4 成形水分とヤング率

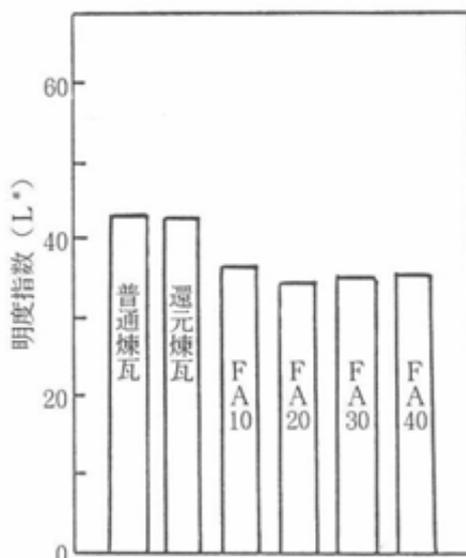


図5 石炭灰添加による明度変化

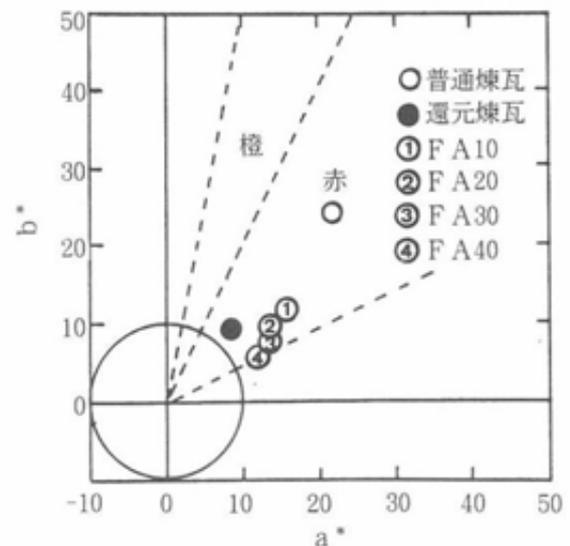


図6 石炭灰添加による色調変化

表7 プレス成形によるX20素地の物性値

成形水分 (%)	乾燥		焼成温度 (°C)	収縮率 (%)	圧縮強さ (MPa)	吸水率 (%)	かさ密度 (g/cm <sup>3</sup> )	ヤング率 (×10 <sup>2</sup> MPa)			色調		
	収縮率 (%)	圧縮強さ (MPa)						P	L	X	L*	a*	b*
10	-0.2	7.1	1050	3.7	43.0	11.3	1.90	85	112	99	40.7	21.9	20.0
			1100	5.5	75.8	6.6	2.06	180	228	204	37.3	16.4	12.0
			1150	9.2	80.3	0.9	2.26	279	462	371	35.9	10.6	7.2
15	0.4	6.9	1050	3.8	33.6	11.6	1.90	56	99	78	41.0	21.7	19.3
			1100	5.8	69.9	6.7	2.07	95	211	153	38.3	16.5	12.5
			1150	9.3	80.2	1.2	2.28	258	434	346	35.7	10.0	6.2
20	1.1	5.0	1050	4.6	25.3	12.4	1.88	52	88	70	40.4	21.8	19.1
			1100	6.6	55.9	7.0	2.05	81	188	135	38.5	16.9	12.8
			1150	9.7	92.5	2.4	2.23	164	355	260	36.0	10.1	6.2

P : 加圧方向、L : 直角方向、X : 平均値

表8 プレス成形による焼却灰及び石炭灰添加素地の物性値

試料名	乾燥		焼成温度 (°C)	収縮率 (%)	圧縮強さ (MPa)	吸水率 (%)	かさ密度 (g/cm <sup>3</sup> )	ヤング率 (×10 <sup>2</sup> MPa)			色調		
	収縮率 (%)	圧縮強さ (MPa)						P	L	X	L*	a*	b*
FA0	0.8	8.6	1100	0.8	45.6	8.2	2.09	95	152	124	46.2	21.8	24.3
			1125	4.2	51.4	7.0	2.12	117	193	155	43.6	21.2	22.6
			1150	4.8	54.2	6.2	2.15	119	227	173	42.5	21.1	20.5
FA10	0.4	6.7	1100	0.4	67.4	5.8	2.04	198	221	210	36.9	15.4	11.4
			1125	6.3	82.1	3.1	2.12	228	230	229	33.6	10.3	6.6
			1150	6.4	61.4	1.6	2.17	257	369	313	33.9	8.9	5.9
FA20	0.2	5.5	1100	0.2	40.5	7.6	1.92	192	183	188	35.0	13.4	9.0
			1125	5.2	36.9	5.4	1.98	229	260	245	34.8	10.1	6.5
			1150	5.8	61.7	2.5	2.05	319	341	330	35.9	7.4	5.1
FA30	0	4.8	1100	-0.1	28.9	8.7	1.83	199	216	208	35.2	13.1	8.6
			1125	4.3	38.8	5.8	1.91	254	275	265	35.2	9.4	5.6
			1150	4.9	43.7	3.3	1.95	304	321	313	36.1	5.7	4.9
FA40	0	6.2	1100	0	38.1	7.7	1.84	219	243	231	35.7	11.5	7.2
			1125	3.8	44.2	5.3	1.87	253	265	259	36.0	8.0	5.0
			1150	4.5	44.3	2.8	1.90	347	323	335	35.8	4.4	4.3

P : 加圧方向、L : 直角方向、X : 平均値

焼成後はその差が顕著に現れる。なお白華については成形水分15、20%で成形したものは発生したが、10%水分では発生しなかった。

### 3.2.2 色調素地

煉瓦土80%、焼却灰20%添加し、成形水分10%、成形圧力19.6MPaでプレス成形したX20素地は煉瓦土100%の素地に比べて、物性が向上し、白華現象も見られない。しかしながら色調及びテクスチャーに際立った特徴がない。そこで石炭灰(5mm以下粒径クリンカーアッシュ)を添加し、新しい色調素地の開発を行った。表8に物性を示す。石炭灰の添加量が多くなると圧縮強さの減少や吸水率の増加など物性は低下する。しかしながら石炭灰10%添加した素地は煉瓦土100%に比べて圧縮強さが大きく、吸水率は少ない。

色調については、図5、図6に示すように石炭灰を添加した素地は還元焼成した煉瓦製品に比べて明度がやや低いものの、極めて類似しており、酸化焼成により、還元焼成風の呈色を示す。また、表面に細かな凹凸を有するなど従来製品にない新しいテクスチャーの素地が開発できた。

## 4. まとめ

(1) 下水道汚泥焼却灰を煉瓦土に添加すると、機械的強度の増加、吸水率の低下など物性面は向上する。しか

しながら、押出成形においては、添加量が多くなると焼却灰は可塑性がないため、成形がむつかしくなったり、焼成収縮が大きくなるので製品寸法の管理上問題を生ずる。

- (2) 下水道汚泥焼却灰は可溶性塩類を多く含み、多量に添加すると、白華現象の心配も出てくる。白華を生ずると煉瓦では素地肌が悪くなり、商品価値を損なうことがあるが、特に白華現象を生じた素地肌を新しい素材感として評価する場合は問題ない。
- (3) 煉瓦土70%、焼却灰20%、石炭灰10%の調合物を成形水分10%、成形圧力19.6MPaでプレス成形し、1100℃で焼成した素地は煉瓦土100%の素地に比べて、圧縮強さの増加や吸水率の低下など物性が向上し、白華現象も見られない。
- (4) 下水道汚泥焼却灰や石炭灰など非可塑性原料で、可溶性塩類を多く含む原料の成形方法として、半乾式プレス成形法が有効なものであることが分かった。

## 文 献

- 1) 石炭灰ハンドブック(平成2年版), 環境技術協会編.(1990).