

汚泥の低温焼結技術の開発（第1報）

熊谷 哉*，伊濱 啓一**，伊藤 隆*，林 茂雄*，
日比野 剛***，川合 啓之****，橋本 典嗣*

Study of Low-temperature Firing Technique for Ash of Sewage Sludge (1st Report)

by Hajime KUMAGAI, Keiichi IHAMA, Takashi ITO,
Shigeo HAYASHI, Tsuyoshi HIBINO,
Hiroyuki KAWAI and Noritsugu HASHIMOTO

The effective utilization of the incinerated ash of sewage sludge are of considerable practical concern. Recently, several investigations have been conducted on the use of the incinerated ash of sewage sludge in the production of tiles and bricks. The purpose of this study is the development of low-temperature firing technique for the incinerated ash of sewage sludge. The characterization of the incinerated ash of sewage sludge was first performed by differential thermal analysis, X-ray powder diffraction and chemical analysis, and then the properties of sintering the incinerated ash of sewage sludge with various composition by additional materials, such as quartz, kaolinite, feldspar and calcite, were examined. Furthermore, some tiles, which consist of the incinerated ash of sewage sludge and clays as raw materials, were produced an experimental based on the present technique.

Key-words : ash of sweage sludge, effective utilization, low-temperature firing

1. はじめに

下水道の普及に伴い、全国的に汚泥の発生量が年々増加し社会問題となっているが、これら汚泥のほとんどは埋め立て処分されているのが現状である。しかし、埋め立て処分場にも限界があり、また新たな処分場の確保が難しいなどの問題がある。そのため、多くの自治体では汚泥の減容化、減量化、無害化および再資源化などの取り組みがなされている。

そこで本研究では、汚泥焼却灰の特性の把握を行う

とともに、県内外の汚泥に関する調査を行い、その結果をもとに下水汚泥焼却灰を窯業原料として活用する方法について検討を行った。具体的には、押出成形によって出来るだけ低温での焼成による、大型タイルの試作を行うことを目的とした。

2. 県内外の状況（調査研究）

県内および県外の下水処理場の調査を行い、その汚泥の生成過程、処分方法、処理量および処理コストなどについて以下の知見を得た。

三重県下の下水汚泥に関しては、平成8年度に県下で稼働中の下水処理施設は、流域下水道の3処理場を合わせて19処理場があり、その発生汚泥量は脱水ケーキベースで毎年約22,000tである。今後下水処理場の整備とともに、その発生量は年々増加するものと思

* 窯業センター材料開発グループ
** 科学技術振興センター
*** 窯業センター伊賀分場
**** 財団法人 下水道公社

われる。この下水処理汚泥の一部はセメント原料に利用されているが、ほとんどの汚泥は埋め立て処分されている。

一方、県外については、下水汚泥を中心とした汚泥はほとんどが埋め立て処分されているものの、セメント原料への活用や汚泥焼却灰を100%使用した赤レンガの製造も一部で行われている。生汚泥を約800で仮焼すると重量を1/20に減量化できることから、汚泥焼却灰の利用も含めた生汚泥の処理方法別のコスト計算を行った。そのコスト計算結果を表1に示す。この表では生の汚泥を仮焼すると重量が約1/20になることを考慮して、年間約3,000tの灰、すなわち約60,000tの生の汚泥を処理する場合のコスト計算を、各種の処理方法ごとに示した。なお、仮焼に係る焼成・補修費用を生汚泥1tあたり500円とした。その結果、行政の支援を加味した上で、汚泥の焼却灰を用いて土木、建築資材および窯業製品等の高付加価値製品を高効率に生産すれば、コスト的にも汚泥は十分有効

利用できることが示された。

3. 汚泥のキャラクターゼーション

出発原料の主成分となる汚泥の性状を調べるために、乾燥汚泥および汚泥を300～1150で焼成したものについて化学分析等を行った。さらに、重金属などについての溶出試験も行った。

3.1 試料

汚泥は、三重県北勢流域下水道の下水汚泥（平成9年10月採取）であり、それを110℃、3時間乾燥したものと300～1150で焼成したものをそれぞれ分析した。

試料の焼成方法は、乾燥した試料を65mmφの金型を用いて、25tの力でプレス成形した後に、電気炉にて100℃までを1時間で昇温し、その後所定の焼成温度まで1時間当たり200℃の昇温速度で加熱して、所定の焼成温度での保持時間を1時間とした。得られたペレットをめのう乳鉢で50μm以下に粉碎して化学分

表1 汚泥処理コストの計算比較

	処理場への投棄の場合 (A県)	処理場へ投棄の場合 (B県)	セメント原料化の場合	A県の焼成灰レンガの 場合	高付加価値化・高効率 生産の場合
処理費	処理場への投棄費 20,000円/t×3,000t灰 = 60,000,000円	処理場への投棄費 30,000円/t生であるので 30,000円/t生×60,000t生 = 1,800,000,000円	セメント会社への委託費 10,000円/t×3,000t = 30,000,000円	再委託費(8名の人員費 含む、運転・補修費用等 は含まない) 142,000,000 円 ※委託内容の割に非 常に高い	生産の再委託は行わず、 公社職員12～14名で運 営する 人件費の項に積算する
処理場 建設費	不明 補償費を含めると??	民間処理業者のため投 棄費を含む	なし	なし	なし
運搬費	5,000円×3,000t = 15,000,000円	5,000円×60,000t = 300,000,000円	5,000円×3,000t = 15,000,000円	なし	なし
仮焼費 (補修)	500円×60,000t生 = 30,000,000円	なし	500円×60,000t生 = 30,000,000円	500円×60,000t生 = 30,000,000円	500円×60,000t生×0.8 = 24,000,000円
本焼成費 (補修)	なし	なし	なし	120,000,000-30,000,000 = 90,000,000円	90,000,000円×0.8 = 72,000,000円
人件費 (公社)	公社職員 3～4名(仮焼要員含) 7,000,000円×4名 = 28,000,000円	公社職員 3名は必要 7,000,000円×3名 = 21,000,000円	公社職員 3～4名(仮焼要員含) 7,000,000円×4名 = 28,000,000円	公社職員 現状8名(販売要員含) 7,000,000円×8名 = 56,000,000円	職員14名 (仮焼、販売要員含) 7,000,000円×14名 = 98,000,000円
売上げ	なし	なし	なし	現状では歩留まりが悪く3 千tの灰で70～80万個を 生産・販売 120円/個×700,000個 = 84,000,000円	高付加価値製品を高効 率に生産 400～500円/個 を100万個生産 450円/個×1,000,000個 = 450,000,000円
トータル コスト	133,000千円+60,000t生 =2,216円/t生 +処理場建設費	2,121,000千円+60,000t生 =35,350円/t生	103,000千円+60,000t生 =1,716円/t生	234,000千円+60,000t生 =3,900円/t生	256,000千円+60,000t生 =4,266円/t生 の利益が 出る

析用の試料とした。また、アルミナ乳鉢で 500 μ m 以下に粉碎して溶出試験用の試料とした。

3.2 下水汚泥の熱分析

図 1 に下水汚泥乾燥物の熱分析の結果を示す。熱重量測定 (Thermogravimetry, TG) の結果から、50 付近から重量減少が始まり、200 付近から急激な重量減少を示し、511 で重量減少は完了した。最終重量減少率は 85.69%であった。また、示差熱分析 (Differential thermal analysis, DTA) の結果から全体に燃焼と考えられる発熱反応が見られ、300 付近と 450 付近でそのピークが確認された。

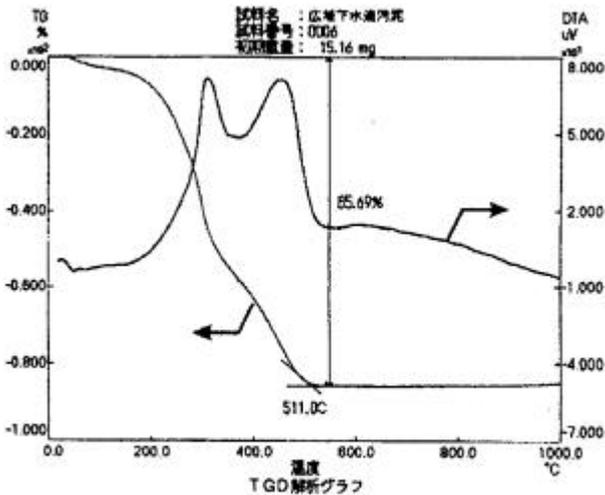


図 1 下水汚泥乾燥物の熱分析(TG-DTA) 曲線

3.3 下水汚泥および焼成物の鉱物組成

粉末 X 線回折法を用いて試料の鉱物組成の定性分析を行った。定性結果を表 2 に、また各焼成温度における回折 X 線パターンの変化を図 2 に示す。この図から、汚泥の焼成温度が高くなるにつれ、リン酸アルミニウムのピークが鋭くなっており結晶化が進んでいることがわかる。

3.4 下水汚泥および焼成物の化学分析

3.4.1 蛍光 X 線分析による定性定量分析

試料を粉末プレス法にて調製して、定性分析とファンダメンタルパラメータ法 (FP 法) を用いた定量分析を行った。FP 法による定性・定量結果を表 3 に示す。

3.4.2 蛍光 X 線分析による定量分析

試料をガラスビード法にて調製して、蛍光 X 線分析装置による検量線を用いた定量分析を行った。その定量結果を表 4 に示す。

3.4.3 リンと硫黄の分析

リンは地質調査書化学分析法、地球科学的試料の化学分析法 2 の「りん鉱物の分析方法」のリンバナドモリブデン酸塩吸光度法¹⁾にて、また、硫黄は日本工業規格「鉱石中の硫黄定量方法」(JIS M 8122-1994)の硫酸バリウム重量法²⁾にて分析を行った。その定量結果を表 5 に示す。

3.4.4 鉛とカドミウムの分析

鉛 (Pb) は日本工業規格「鉱石中の鉛定量方法」(JIS M 8123-1994)の原子吸光法³⁾にて、またカドミウム (Cd)

表 2 下水汚泥と焼成物の鉱物組成

焼成温度	鉱物組成
110°C	α -SiO ₂ (Quartz)
300°C	α -SiO ₂ (Quartz)
400°C	α -SiO ₂ (Quartz)
500°C	α -SiO ₂ (Quartz)
600°C	α -SiO ₂ (Quartz)
700°C	α -SiO ₂ (Quartz)
800°C	α -SiO ₂ (Quartz), AlPO ₄ (Tridymite type), KAlSi ₃ O ₈ (Orthoclase)
850°C	α -SiO ₂ (Quartz), AlPO ₄ (Tridymite type), KAlSi ₃ O ₈ (Orthoclase), CaAl ₄ O ₇
900°C	α -SiO ₂ (Quartz), AlPO ₄ (Tridymite type), CaAl ₄ O ₇ , KAlSi ₃ O ₈ (Orthoclase)
950°C	AlPO ₄ (Tridymite type), α -SiO ₂ (Quartz), CaAl ₄ O ₇ , KAlSi ₃ O ₈ (Orthoclase)
1000°C	AlPO ₄ (Tridymite type), α -SiO ₂ (Quartz), CaAl ₄ O ₇ , Ca ₃ Al ₂ O ₆ , KAlSi ₃ O ₈ (Orthoclase)
1050°C	AlPO ₄ (Tridymite type), α -SiO ₂ (Quartz), CaAl ₄ O ₇ , Ca ₃ Al ₂ O ₆ , KAlSi ₃ O ₈ (Orthoclase)
1100°C	AlPO ₄ (Tridymite type), α -SiO ₂ (Quartz), CaAl ₄ O ₇ , Ca ₃ Al ₂ O ₆ , Al ₂ O ₃ (Corundum), KAlSi ₃ O ₈ (Orthoclase)
1150°C	AlPO ₄ (Tridymite type), α -SiO ₂ (Quartz), Al ₂ O ₃ (Corundum), CaAl ₄ O ₇ , Ca ₃ Al ₂ O ₆ , KAlSi ₃ O ₈ (Orthoclase)

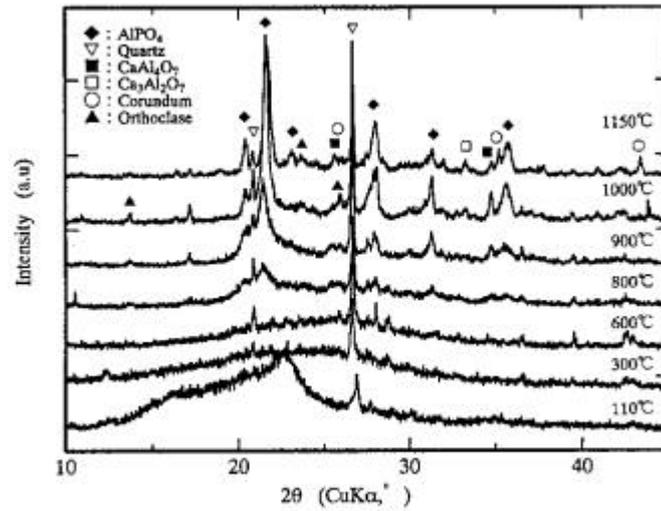


図2 下水汚泥の焼成による鉱物組成の変化

表3 下水汚泥と焼成物のFP法による定性・定量分析結果 (wt%)

	110℃	400℃	500℃	600℃	700℃	800℃	900℃	1000℃	1100℃
SiO ₂	13.84	17.33	18.37	19.92	20.36	21.46	22.74	23.70	27.36
Al ₂ O ₃	17.03	20.99	23.44	26.09	28.15	28.29	30.53	31.57	33.18
Fe ₂ O ₃	2.80	2.75	2.48	2.60	2.52	2.46	2.69	2.64	2.63
TiO ₂	0.66	0.67	0.62	0.65	0.64	0.62	0.67	0.67	0.69
MnO	0.06	0.06	0.05	0.06	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06
CaO	7.02	7.20	6.79	7.65	7.53	7.41	8.12	8.00	8.01
MgO	1.22	1.45	1.56	1.71	1.90	1.89	2.00	2.01	2.19
Na ₂ O	0.42	0.44	0.49	0.54	0.59	0.61	0.65	0.69	0.75
K ₂ O	0.99	1.08	1.03	1.09	1.09	1.08	1.18	1.17	1.17
P ₂ O ₅	17.16	19.85	20.61	22.98	22.92	23.72	26.14	26.22	21.47
N ₂ O ₅	19.17	17.09	15.06	7.93	7.08	6.03	—	—	—
CO ₂	8.87	7.20	3.23	2.80	1.28	1.02	0.42	0.15	—
SO ₃	7.02	4.47	3.62	3.06	2.74	2.79	2.60	1.24	0.49
BaO	1.20	1.25	1.14	1.20	1.19	1.20	1.35	1.35	1.36
ZnO	0.26	0.24	0.21	0.22	0.21	0.21	0.22	0.10	0.03
Cl	0.43	0.20	0.18	0.17	0.11	0.07	0.03	—	—
CuO	0.19	0.18	0.16	0.17	0.16	0.15	0.17	0.16	0.16
SrO	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04
Cr ₂ O ₃	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
PbO	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	—	—
NiO	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Br	0.02	0.01	0.12	0.01	0.01	0.01	—	—	—
F	1.55	—	0.85	1.05	1.36	0.83	0.33	0.17	0.38

表4 下水汚泥と焼成物の定量分析結果 (wt%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Ig. Loss
110℃	4.74	4.92	0.46	0.09	0.01	1.29	0.41	0.18	0.22	4.09	83.33
300℃	8.24	8.54	0.80	0.14	0.01	2.20	0.71	0.31	0.38	6.77	71.34
400℃	11.10	11.45	1.09	0.21	0.02	2.99	0.96	0.41	0.51	9.51	61.17
500℃	13.35	13.73	1.30	0.25	0.02	3.58	1.14	0.49	0.62	11.38	53.38
600℃	15.66	16.17	1.53	0.30	0.03	4.22	1.34	0.57	0.73	13.42	45.11
700℃	18.36	18.95	1.79	0.34	0.03	4.95	1.57	0.68	0.85	15.72	35.68
800℃	21.36	22.16	2.09	0.40	0.04	5.77	1.83	0.78	1.00	18.36	24.94
850℃	22.41	23.25	2.18	0.42	0.04	6.00	1.94	0.84	1.05	18.49	21.63
900℃	25.16	25.90	2.45	0.47	0.04	6.76	2.15	0.93	1.18	21.47	12.03
950℃	25.60	26.52	2.48	0.48	0.05	6.87	2.22	0.94	1.21	21.14	10.28
1000℃	27.25	28.18	2.68	0.51	0.05	7.34	2.32	0.97	1.27	23.34	4.68
1050℃	28.29	29.42	2.74	0.53	0.05	7.59	2.45	1.00	1.30	22.37	2.21
1100℃	29.16	30.31	2.85	0.55	0.05	7.91	2.51	0.99	1.33	22.52	0.48
1150℃	29.35	30.61	2.84	0.55	0.05	7.90	2.54	0.98	1.30	19.91	0.44

表5 下水汚泥乾燥物と焼成物のリン・硫黄定量分析結果 (wt%)

	110℃	300℃	400℃	500℃	600℃	700℃	800℃	900℃	1000℃	1100℃
P ₂ O ₅	5.11	8.25	10.83	12.94	15.09	18.24	20.18	23.32	25.25	24.19
SO ₂	1.36	1.08	1.93	2.22	1.58	2.16	1.84	2.12	0.71	0.36

表6 下水汚泥乾燥物と焼成物の鉛・カドミウム定量分析結果 (wt%)

	110℃	300℃	400℃	500℃	600℃	700℃	800℃	900℃	950℃	1000℃	1050℃	1100℃	1150℃
Pb	0.10	0.30	0.51	0.53	0.69	0.88	1.05	1.01	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00
Cd	0.01	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

は日本工業規格「鉱石中のカドミウム定量方法」(JIS M 8135-1994)の原子吸光法⁴⁾にて分析を行った。その定量結果を表6に示す。

3.5 下水汚泥および焼成物の溶出試験

3.5.1 溶出試験方法

環境庁告示第13号「産業廃棄物に含まれる金属等の検定方法」⁵⁾に従い、溶出試験を行った。下水汚泥および各焼成物の溶出液は、抽出液としてpH6.1の蒸留水を用いて、試料30gに対して抽出液300mlを加え(試料:蒸留水=1:10)、三角フラスコ(300ml)を用いて恒温振とう器にて、20℃で6時間、200rpmの条件で振とうを行い、振とう終了後、30分以内に濾紙(5C)にて吸引濾過を行って得た。

3.5.2 リンと硫黄の分析

リンは、リンバナドモリブデン酸塩吸光光度法¹⁾に

て、硫黄は、硫酸バリウム重量法²⁾にて分析を行った。リンと硫黄の溶出量(mg/l)を表7に示す。

3.5.3 塩素の分析

塩素は、イオンクロマトグラフにて塩素イオンとして定量を行った。塩素イオンの溶出量(mg/l)を表8に示す。

3.5.4 鉛とカドミウムの溶出量の測定

PbとCdの溶出量を原子吸光光度計にて定量分析を行った。その結果を表9に示す。表9から、Cdは300℃以上で焼成した試料においては溶出しないことが、またPbは700℃以上では溶出せず、最も多く溶出した400℃の場合でも、その溶出量は0.03mg/l以下であることがわかった。これらの結果から、Pb、Cdともに産廃基準(埋立処分、環告第13号)⁹⁾の基準値である0.3mg/lをいづれの焼成温度においても下回るこ

表7 溶出液中のリン・硫黄の定量分析結果 (mg/l)

	110℃	300℃	400℃	500℃	600℃	700℃	800℃	900℃	1000℃	1100℃
P ₂ O ₅	10.77	2.64	1.95	1.77	1.44	1.41	1.44	1.65	2.37	0.45
SO ₃	8.40	3.42	10.89	23.28	18.07	20.97	32.05	39.87	21.14	4.53

表8 溶出液中の塩素イオン濃度 (mg/l)

	110℃	300℃	400℃	500℃	600℃	700℃	800℃	900℃	1000℃	1100℃
Cl ⁻	0.224	25.794	28.979	29.365	18.064	4.825	2.994	0.806	0.064	0.183

表9 溶出液中の鉛・カドミウム濃度 (mg/l)

	110℃	300℃	400℃	500℃	600℃	700℃	800℃	900℃	1000℃	1100℃
Pb	0.000	0.027	0.029	0.004	0.011	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cd	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

とが明らかとなったが、土壤環境基準（環告第46号、基準値 0.01mg/l）⁹については、600℃以下の焼成物で、Pbの溶出量が基準値を越えることとなった。

3.5.5 砒素と水銀の定性分析

溶出液中の砒素と水銀を結合誘導プラズマ発光分光分析装置（ICP）にて定性分析を行った。その結果、いずれの溶出液にも砒素と水銀の存在は認められなかった。

3.6 焼成温度による含有元素の変化

焼成温度による含有元素の変化量を調べるために、各試料の強熱減量(Ig.Loss)を除いた部分における各元素の含有量を比較した。具体的には、各元素の定量分析結果を(100-Ig.Loss)/100で除算を行った。Ig.Loss分を除いた各元素の含有量の変化を図3から図5に示す。

図3から下水汚泥の主成分であるSiO₂とAl₂O₃分は焼成温度が800℃より高くなるに従って緩やかに増加しており1150℃で最大となっている。また、図4からもう1つの主成分であるP₂O₅分は、それとは逆に800℃より高くなるに従って緩やかに減少をしており1150℃で最小となっている。さらに、図3からCaO、Fe₂O₃およびMgO分もおおよそ800℃より高くなるに従って緩やかに増加していることがわかる。これは、焼成温度が800℃以上で主成分の一つであるリンが揮発することで他の珪素、アルミニウム、カルシウム、鉄およびマグネシウムの含有量が相対的に大きくなるためと考えられる。一方、図4から硫黄の含有量は下水汚泥を110℃で乾燥したものが最大で、焼成温度が高くなるほどその含有量は減少して、1150℃

で最小となっていることがわかる。また、図5から重金属である鉛は1000℃で、カドミウムは950℃で完全に揮発して焼成物中には存在しなくなることがわかる。

3.7 焼成温度による溶出元素の変化

3.6と同様に、焼成温度による溶出元素の変化量を調べるために、各試料の強熱減量(Ig.Loss)を除いた部分における各元素の溶出量を比較した。Ig.Loss分を除いた焼成温度の変化によるP₂O₅の溶出量の変化を図6に、Cl⁻の溶出量の変化を図7にそれぞれ示す。

図6からリンの溶出量は焼成温度が高くなるに従って緩やかではあるが減少していることがわかる。これは、焼成温度が高くなるほどリン酸アルミニウムの結晶化が進んでいることから、リンが溶出しにくくなりリンの溶出量が減少しているものと考えられる。次に、図7から塩素の溶出量は110℃で乾燥した下水汚泥では約1.3mg/lと微量であるのが、300℃で焼成したものは90mg/lの溶出量があり、全試料中で最大の値を示した。また、400℃から900℃と温度が高くなるに従って溶出量が急激に減少し、1000℃以上では極微量となった。これは、600℃以下程度の焼成では塩素が下水汚泥中から揮発せず、より水に溶けやすい活性な状態になっているものと考えられる。1000℃以上では表3のFP法による塩素の定性・定量結果から塩素は検出されないことから下水汚泥から塩素分が完全に揮発したことによって溶出もしなかったと考えられる。

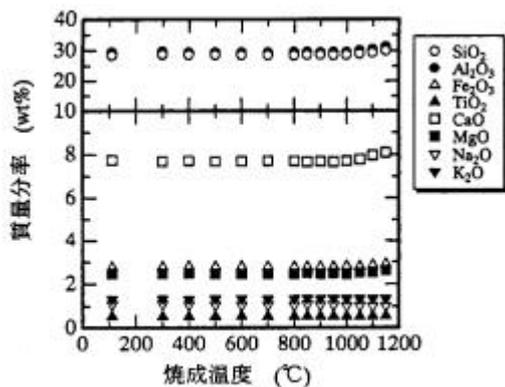


図3 Ig.Loss分を除いた場合の焼成温度による含有元素変化量

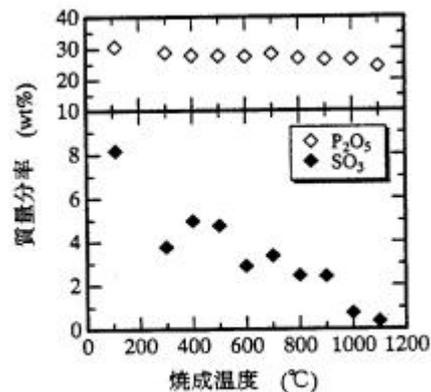


図4 Ig.Loss分を除いた場合の焼成温度によるリンと硫黄の変化量

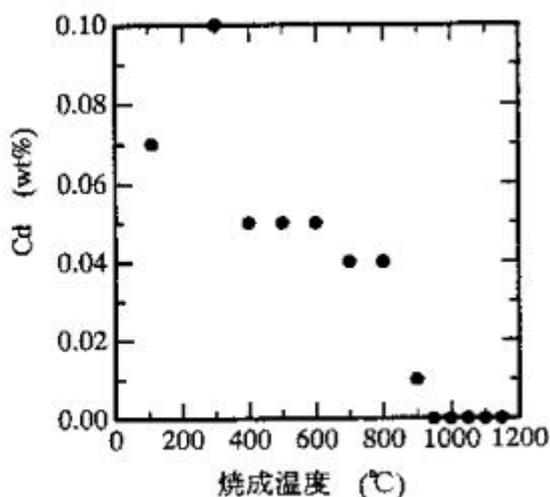
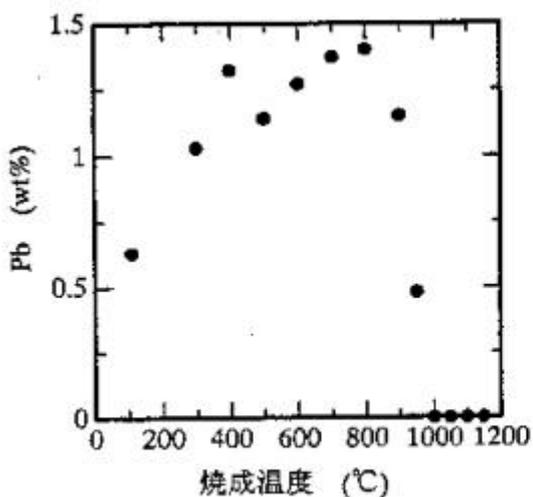


図5 Ig.Loss分を除いた場合の焼成温度による鉛とカドミウムの変化量

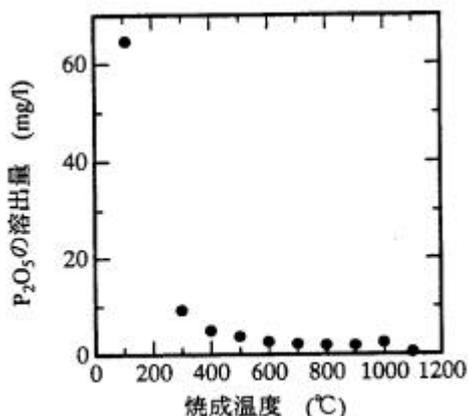


図6 焼成温度によるリンの溶出量の変化

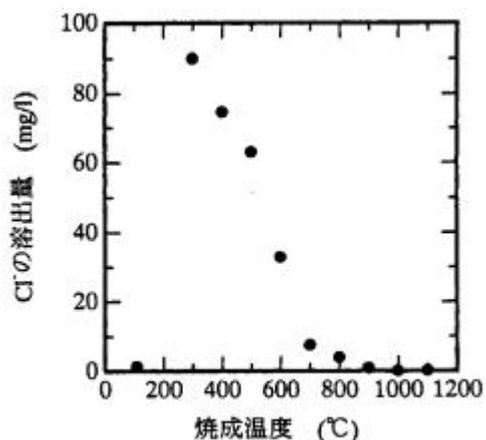


図7 焼成温度による塩素の溶出量の変化

4. 焼結性の試験

汚泥焼却灰単味の焼結性を調べることによってその特性を把握し、また焼結温度幅の拡大や低温での焼結を目的に、様々な原料を添加してその焼結特性につい

て検討を行った。添加した原料を表 10 に示す。試験は以下の方法で行った。まず約 800 で仮焼した汚泥をボールミルで 6 時間湿式粉碎し、乾燥したものに各原料を 10 ~ 30% 添加した。これを $1t/cm^2$ の圧力で

表10 添加物の種類

添加物名称	詳細名称	主成分
珪石	福島珪石	SiO ₂
ペーマイト	触媒廃棄物	Al ₂ O ₃ , H ₂ O
カオリン	ニュージーランドカオリン	Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , H ₂ O
長石	新島長石	Na ₂ O, K ₂ O, Al ₂ O ₃ , SiO ₂
石灰石	鳳石灰石	CaCO ₃

レス成形し、電気炉によって、200℃/hrの昇温および冷却速度（所定温度での保持30分）で焼成を行い、その焼結性について検討を行った。

焼成体の吸水率と嵩密度を測定した結果を図8に示す。仮焼汚泥単味の焼結温度（磁器化温度）は、1040℃付近であり、焼結温度幅は非常に狭く、5～10℃程度の幅しかないと考えられる。従って、仮焼汚泥単味で緻密な焼結体を得るには、厳密な焼成温度の制御が必要である。これは、他所での下水汚泥の焼成試験結果と同様である^{7,8)}。

焼結温度の低下と焼結温度幅の拡大を目的として、各種添加物の影響を調べた結果、珪石、長石の添加では大きな変化はなかった。また、ペーマイト、カオリンの添加では、焼結温度は高くなったが、焼結温度幅を拡大することはできなかった。

これらから、アルミナ分の添加は焼結温度を高くし、シリカ分の添加はあまり影響を及ぼさないことがわかったが、シリカ分をさらに多く添加すれば何らかの影

響が現れてくるものと思われる。

また、石灰石の添加は著しく焼結性を悪くした。これは、石灰石の分解温度が900℃付近にあり、炭酸ガスの発生で焼結が阻害されることや化学組成的に塩基成分が多くなりすぎることが原因と推察される。

5. 焼結技術を利用した汚泥タイルの試作開発

ここでは、下水汚泥をロータリーキルンで焼却した汚泥焼却灰を使って、押出成形で30cm角の大形タイルを試作することを目的として、添加する可塑性粘土やシャモットについて検討を行った。

5.1 汚泥焼却灰の性状

ここで用いた灰はロータリーキルンで焼却したものであり、流動倍床炉で焼いた灰（非常に細かい粉体）とは異なり、硬くてかなり粗い粒子が混在している。その分析値と粒度分布を表11と表12にそれぞれ示す。

5.2 可塑性粘土の選定

可塑性粘土を添加することによって、成形性の向上や焼成温度幅の拡大について検討を行った。使用する粘土として赤松粘土（原土）を選定した。その分析値と単味の焼成性状を表13と図9にそれぞれ示す。

5.2.1 赤松粘土を添加した場合の焼成性状の検討

汚泥焼却灰に可塑性粘土である赤松粘土を添加し、その焼結特性について試験を行った。試験は汚泥焼却灰と赤松粘土の配合比を重量基準で50:50, 60:40, 70:30, 80:20と4種類に変化させて行った。粉末にした赤松粘土および汚泥焼却灰を乾式混合し、一定の割合となるよう水を添加して練り土状態にした。成

表11 汚泥焼却灰の分析値 (wt%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Ig.Loss
27.35	22.35	15.51	0.55	0.12	10.81	2.99	0.98	1.85	16.48	0.99

表12 汚泥焼却灰の粒度分布 (wt%)

14メッシュ篩上 (粒径>300μm)	20メッシュ篩上 (>864μm)	42メッシュ篩上 (>355μm)	100メッシュ篩上 (>140μm)	200メッシュ篩上 (<74μm)	200メッシュ篩下 (<74μm)
11.70	14.61	21.93	19.77	12.20	19.81

表13 赤松粘土の分析値 (wt%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Ig.Loss
67.95	18.36	2.62	1.03	tr.	0.32	0.68	0.08	1.74	tr.	6.8

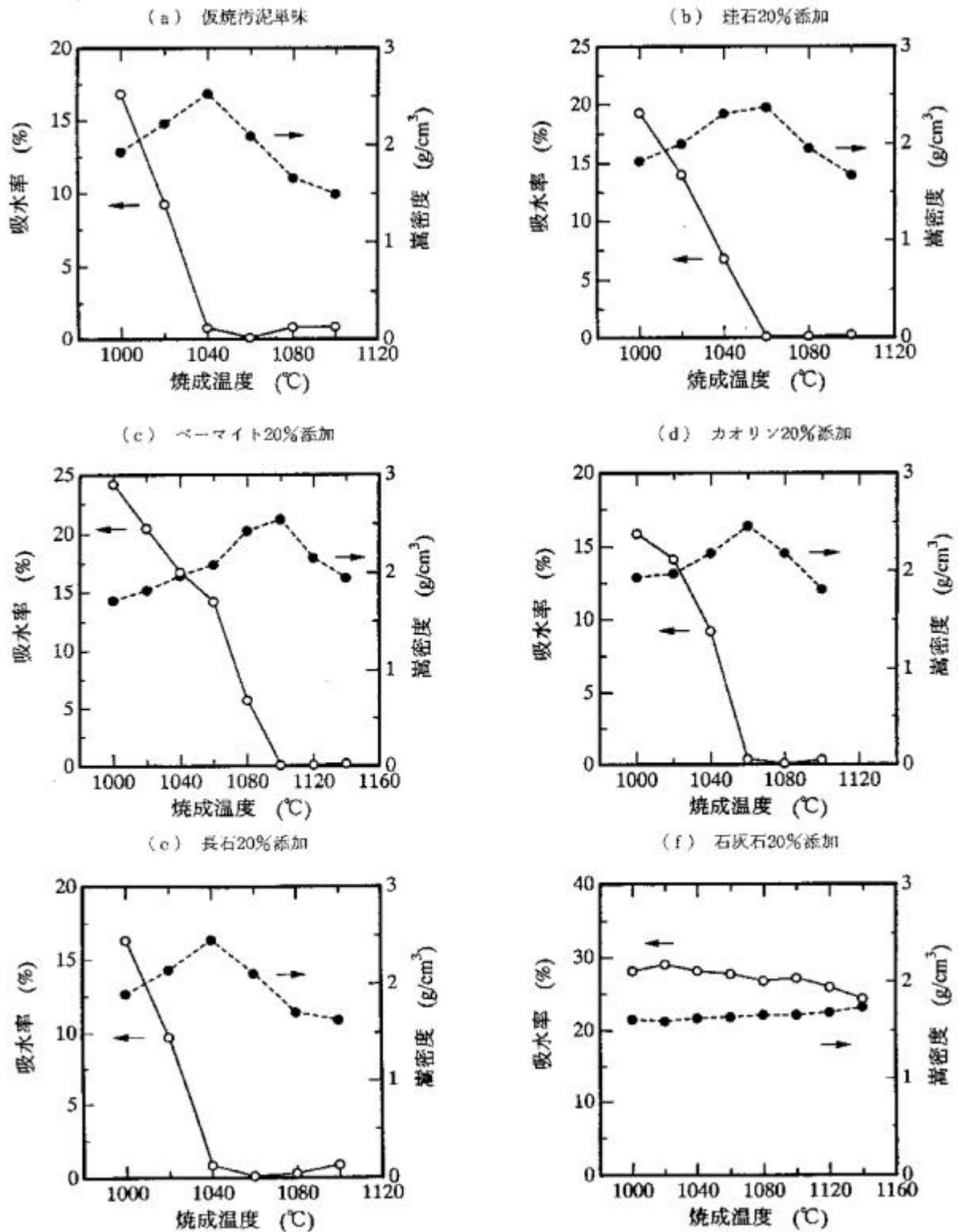


図8 焼成温度と吸水率・嵩密度の関係

形は小型押出成型機を用いて 1cm × 3cm の棒状試験体とし、各温度で焼成を行った。以後試験体の成形はこの方法に従った。

その結果、配合割合が 80 : 20 では可塑性不足で押出成形が不可能であった。また、70 : 30 では押出成

形後の試験体の角に亀裂が入った。そのため 60 : 40 または 50 : 50 が基本的な配合として適当であると思われる。しかしながら、シャモットなどの添加を考慮すると可塑性の面で 50 : 50 が最も適当であると考えられる。試験体の焼成性状を図 10 に示す。

5.2.2 湿式細磨時間による焼成性状変化の検討

実際に現場でタイル素地（練り土）を作る場合、乾式混合ではなくポットミルを用いた湿式細磨で行うため、基本配合（50：50）について最適な細磨時間について検討を行った。

汚泥焼却灰と赤松粘土を 50：50 の割合で配合して、ポットミルで 6、12、18 時間湿式細磨したものを押出成形を用いて試験体とし、その焼成性状を調べた。その結果、6 時間と 18 時間とではほとんど差はみられず、以降の試験ではポットミルで 6 時間湿式細磨したものを乾燥し粉末にしたものを基本配合として使用した。

5.3 赤シャモットの添加による焼成性状変化の検討

陶磁器くずである赤シャモットを収縮率の抑制を目的に添加し、その焼成性状について検討を行った。50：50 の基本配合にシャモットを外割で 10、20、30% それぞれ混合したものに水を添加し練り土にした。そしてそれを押出成形で試験体を作成しその焼成性状を調べた。その結果を図 11 に示す。

その結果、シャモット 30% 添加でも押出成形が可能であり、シャモットの添加割合が増えると焼成温度が高くなる傾向へ、また焼成温度幅が多少広がる傾向があることがわかった。

6. まとめ

汚泥のキャラクタリゼーションを把握するため様々な分析等を行い、さらにその焼結特性や試作開発の検討を行った結果、以下のことが明らかとなった

- ・本報告における下水汚泥において、強熱減量部分を除いた主成分は、 SiO_2 、 Al_2O_3 および P_2O_5 でありそれぞれ約 30% である。
- ・本報告における下水汚泥を焼成した場合、800 以上でリンが揮発することで相対的にシリカ分とアルミナ分が増加する。硫黄分は、焼成温度が高くなるほど揮発量が多くなる。また、鉛は 1000 で、カドミウムは 950 以上で完全に揮発する。
- ・本報告における下水汚泥の環境庁告示第 13 号による溶出試験の結果、砒素、水銀等の重金属の検出

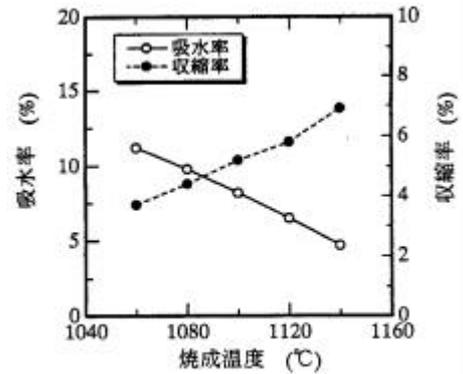


図9 赤松粘土の各温度における焼成性状

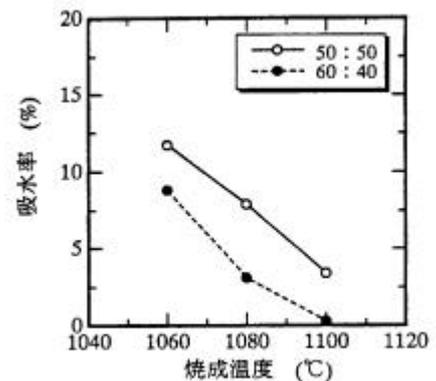


図10 配合比を変えた場合の各温度での焼成性状

はなく、鉛、カドミウムの溶出量は産廃基準(埋立処分、環告第 13 号)に定める基準値以下である。

- ・仮焼汚泥単味の焼結温度幅は、非常に狭く 5 ~ 10 程度と考えられる。
- ・仮焼汚泥への 10 ~ 30% のシリカ分の添加では焼結性への影響は少ないが、アルミナ分の添加は焼結温度を高くする。
- ・仮焼汚泥への石灰石の添加は、著しく焼結性を悪くする。
- ・押出成形可能な汚泥焼却灰の使用量は 50 ~ 60% である。
- ・焼成性状より汚泥と粘土のミル摺り時間は、6 時間程度が適切である。

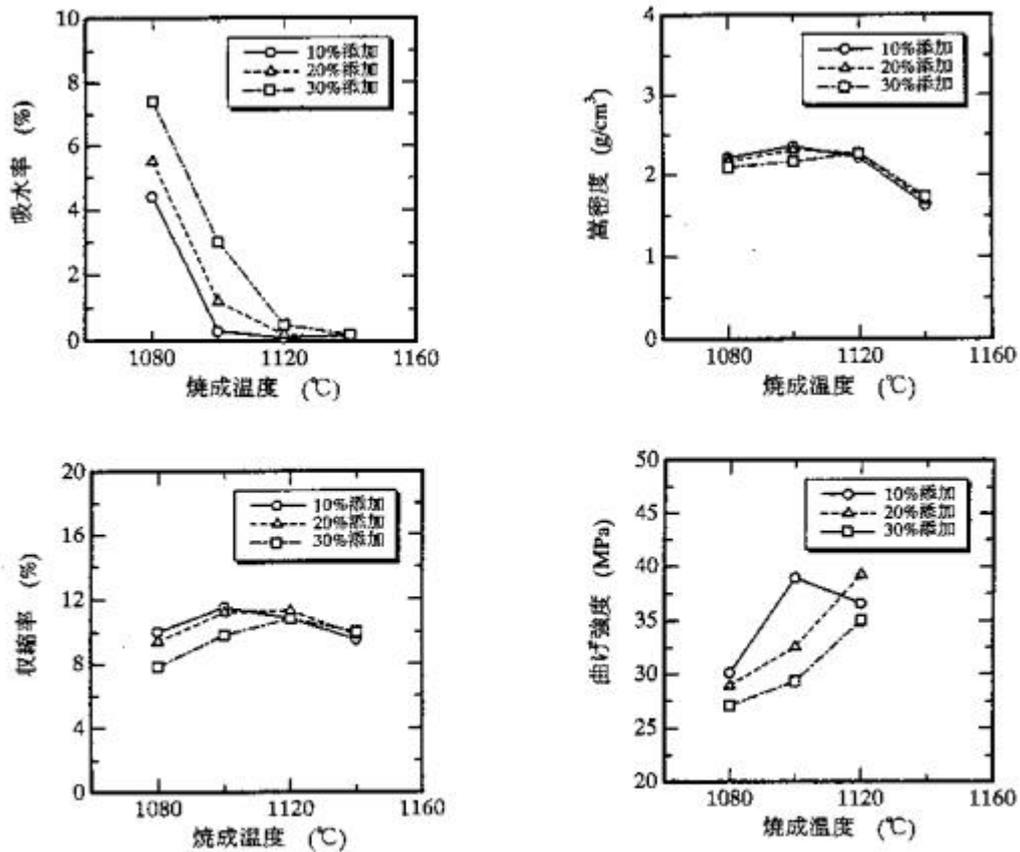


図11 シャモット添加割合による各温度での焼成性状

謝辞

本研究で使用した下水汚泥および下水汚泥の仮焼物は、三重県北勢沿岸流域下水道建設事務所より提供して頂きました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 地質調査所. 地球科学的試料の分析方法2, 1978, p.342
- 2) 鉱石中の硫黄定量方法, JISM8122-1994
- 3) 鉱石中の鉛定量方法, JISM8123-1994
- 4) 鉱石中のカドミウム定量方法, JISM8135-1994
- 5) 環境庁告示 第13号
- 6) 環境庁告示 第46号
- 7) 再生と利用, Vol.19, No.70, p.88-95 (1996)
- 8) PPM, Vol.28, No.3, p.36-42 (1997)