

産業廃棄物の有効活用化に関する研究

諏訪 幸雄* 小島 均*

1. はじめに

産業廃棄物は年間3億トンが排出され、大きな環境問題となっていることから再利用、再資源化への対策が急がれている。

当所は以前から珪酸質産廃物を瓦、タイル及び陶管等の窯業製品への活用を図ってきた。平成2年からは、採石場廃泥や石材研磨スラッジなど大量に発生する珪酸質産廃物を土木建築、農業資材等への活用するため「調合・造粒・焼成」法による人工骨材製造技術の開発を実施した。研究を終了するに当たり、平成2年から平成10年の間に実施した研究結果をまとめた結果を報告する。

2. 産業廃棄物と骨材化技術

2.1 研究の対象とした産業廃棄物と用途

研究の対象は、比較的大量に発生し通常の窯業製品(タイル、陶管、工芸陶磁器等)の原料として利用しにくいスラッジ(廃泥)類等の無機系産業廃棄物とし、有害な物質を含有しないものとした。

《研究の対象とした産業廃棄物》

- ・石材研磨スラッジ ・採砂場廃泥 ・砕石場廃泥
- ・コンクリートスラッジ・ストレート(アスベスト)廃材
- ・ガラス研磨スラッジ・浄水場汚泥・下水処理場汚泥、焼却灰・湖沼底泥(霞ヶ浦底泥)

骨材の種類にはその性質から下記の3種が考えられるが、開発の対象とした骨材は 軽量骨材及び 軟質骨材である。

《骨材の種類と性質》

- 硬質骨材 - 高温焼成：強固，致密
- 軽量骨材 - 発泡焼成：表面硬質で内部多泡体
- 軟質骨材 - 低温焼成：多孔体，高吸水性

骨材の用途には、下記に挙げるものが考えられるが、本研究では、主に 軽量骨材(軽量コンクリート用)及び 農業資材(栽培用土)の開発を行った。

《骨材の用途》

- 土木・建築用骨材(砂利，砂の代替)
- 軽量コンクリート用軽量骨材
- 農業資材(栽培用土)
- 濾過，微生物担体材
- 窯業資材

3. 軽量骨材化技術

焼成体の軽量化は発泡焼成により可能となる。その機構は、素地の加熱により適当な粘性を持った融液が生成し、その際共存するガス発生物質からガスが発生し、融液がガスを取り込んで膨張し多胞体が形成され、これが急冷により固定される。

発泡機構に関わる因子を表1に示す。¹⁾これらの因子の内、焼成条件以外は原料に由来する事項であるため原料組成の把握が重要である。特に化学組成は図1に示すRileyの発泡組成範囲²⁾ [SiO₂: 60~70%], [Al₂O₃: 15~25%], [Fe₂O₃: 5~10%], [CaO+MgO: 0~6%], [K₂O+Na₂O: 3~4%]が良い指標となる。

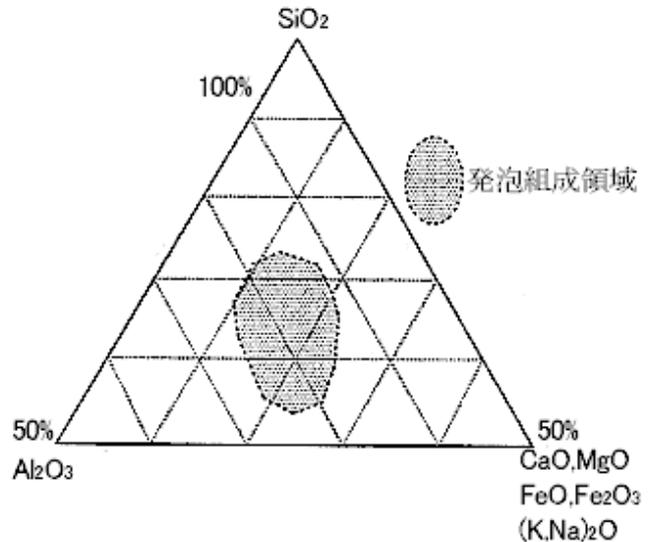


図1 Rileyの発泡組成範囲

表1 発泡機構に関わる因子

化学組成	図1に示すSiO ₂ -Al ₂ O ₃ -Fluxの3成分系座標に示すRileyの発泡組成範囲が一般的である。
ガス発生成分	発泡に関わる加熱によりガスを発生する炭素、酸化第二鉄、炭酸塩、粘土鉱物有機物等
フラックス成分	融液の表面張力や粘性に影響を及ぼし、泡の発生やその成長速度を調節する鉄や珪酸含有する鉱物
焼成条件	焼成の温度，昇温速度，炉内雰囲気

3.1 試験方法

各原料の元素組成等を測定し、この結果からRileyの発泡組成範囲に入る配合割合を求め、試験炉による発泡軽量化試験、ロータリーキルンによる少量試作により目標仕様を満足する製造条件を決定し、製品に使用した場合の評価試験に使用する大量試作及び試作骨材の評価試験を行う。

3.1.1 性状把握

ガス発生物質の総量をlg. loss (灼熱減量1025)測定により求めた。

原料の元素組成は蛍光X線分析法(1:10希釈ガラスビード法)により行った。

3.1.2 発泡軽量化試験

求める仕様が得られる条件：焼成温度，昇温速度及び原料配合等の条件の検討は下記の試験により行った。

試料は所定の配合割合で良く混合した原料粉末(乾燥品)に適量の水を加えよく混練し、手で約10mmに成形し105℃で約12hr程度で良く乾燥した物を使用する。

焼成は、あらかじめ900~1000℃に加熱しておいた電気炉内に試料を入れ所定の昇温速度で加熱し、目標温度に達した後、30分間の保持を行った後又は速やかに炉内より取り出した後放冷した。

焼成した試料は、JIS A1135及びJIS R2205により絶乾比

重,気孔率等の測定を行い,求める仕様を満足する諸条件の検討を行った。

3.1.3 ロータリーキルンによる試作

前述の試験で求めた焼成温度,昇温速度及び原料配合等の条件で,ロータリーキルンを用い少量(10~20kg)の試料を焼成し,各条件の確認を行い強度試験等の評価に使用するために必要な試験体の試作条件を検討する。

この試験で得た諸条件により100kg以上の試作を行い評価試験に供する。試作工程の例を図2に,試作に用いたロータリーキルンの概要を図3に示す。

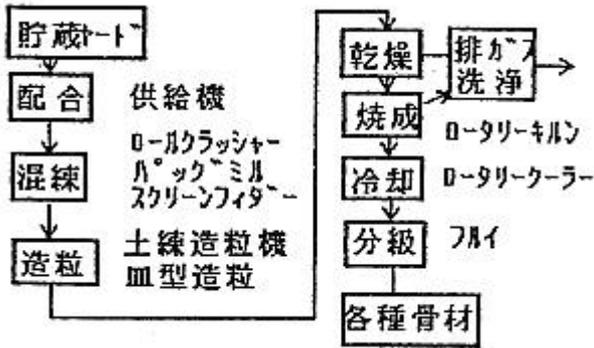


図2 試作工程の例

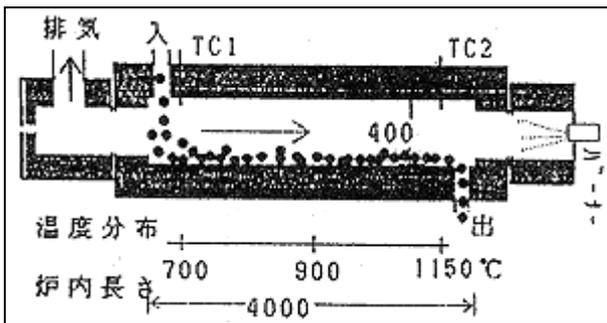


図3 試作に用いたロータリーキルンの概要

3.1.4 実施例

これまでに実施した種々の産業廃棄物を原料とした軽量骨材の開発例について述べる。

3.1.4.a 砕石場廃泥, 石材研磨スラッジ等を主原料にした軽量骨材の開発例^{(3) (4) (5)}

原料の化学組成を表2-1に, Rileyの組成範囲上のプロットを図4-1に示す。

表2-1 産業廃棄物の化学組成

試料名	lg. loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	flax	CaO+MgO	KNaO
1石材研磨スラッジ	1.23	68.80	14.54	3.40	14.75	4.63	6.72
2久の浜廃泥	4.51	73.87	15.24	2.96	8.24	1.20	4.07
3大久廃泥	6.01	66.80	17.95	6.40	14.10	3.36	4.33
4塚田砕石廃粉	1.74	69.40	16.65	4.61	14.27	3.40	6.26
5コンクリートノ	11.62	22.38	6.03	2.56	62.70	59.04	1.10
6霞ヶ浦上水汚泥	27.50	57.79	27.10	7.00	11.21	2.54	1.67
鹿島下水道焼却灰	10.69	0.00	15.69	6.61	58.82	51.66	0.55

石材研磨スラッジ,大久廃泥及び塚田砕石廃粉は組成範囲のほぼ中央に位置し,発泡に有利な組成であるが,久の浜廃泥や下水処理場焼却灰はアルミナ分やアルカリ分が多く含まれ発泡には不利な組成である。

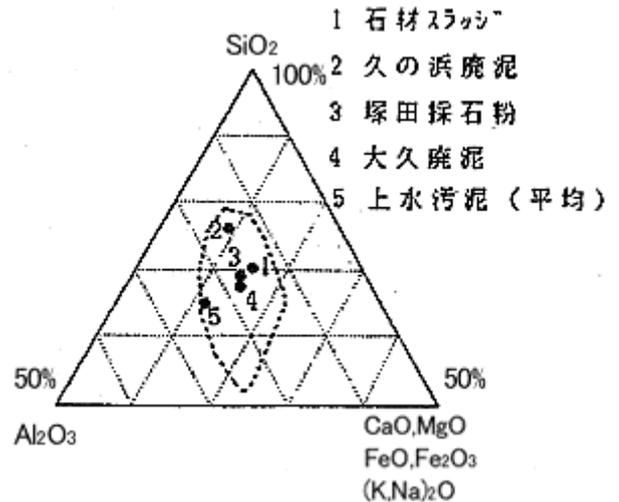


図4-1 産業廃棄物のRileyの組成範囲プロット

原料単体と配合試料について発泡軽量化試験を実施した結果を図4-2に示す。石材研磨スラッジ,大久廃泥及び[石材研磨スラッジ50+大久廃泥50]は発泡性を示したが久の浜砕砂廃泥は焼結した。

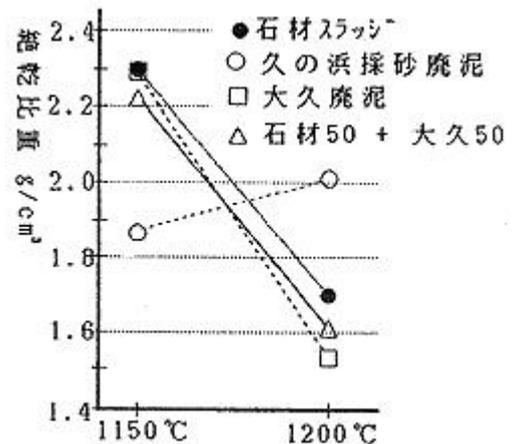


図4-2 発泡軽量化試験結果

この結果から発泡骨材の主原料を石材研磨軽量化への影響の検討スラッジと大久廃泥とし両者の配合を5:5として, Rileyの組成範囲内でCaO成分の多いコンクリートノロ等及び木炭粉の軽量化への影響の検討を行った。各試料の配合を表2-2に, 木炭添加試験結果を図4-3に示す。

表2-2 発泡組成の配合

原料	1	2
石材研磨スラッジ	50	50
大久廃泥	50	50
コンクリートノ	0~9	
木炭		0~2

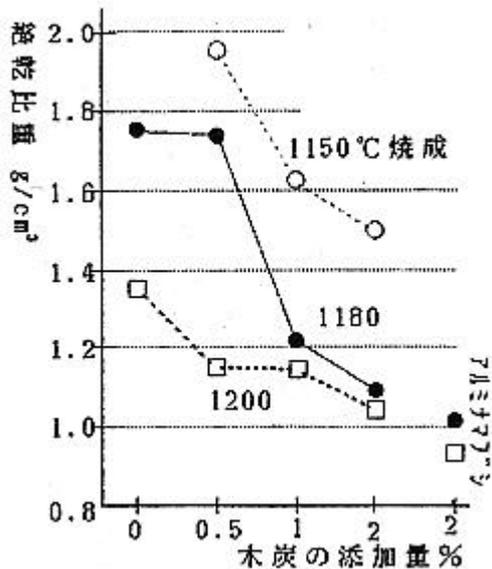


図4-3 木炭添加試験結果

CaO成分の多いコンクリートノロは添加割合3%に最軽量点が生じた³⁾。また、木炭の添加は発泡軽量化に大きく貢献した。加熱は、1000 以上で10~20(/min)の急が必要であった。

試作に用いたロータリーキルン内の昇温速度と骨材の絶対比重の関係を図4-4に示す。発泡領域は昇温速度で20~35(/min)であった。この結果から得た発泡領域と回転数、炉内通過時間との関係を図4-4に示す。

この焼成条件を用い構造用軽量コンクリート骨材の評価試験を行うため表2-3に示す原料配合で軽量骨材を試作した。成型は湿式押し成型後、皿形造粒機で整粒した。キルン回転数2.5(rpm)、焼成温度1130~1150 () で試作した。試作骨材及び市販品の性状を表5に示す。

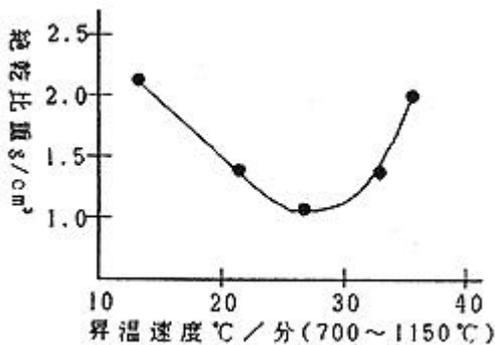


図4-4 昇温速度と骨材絶対比重

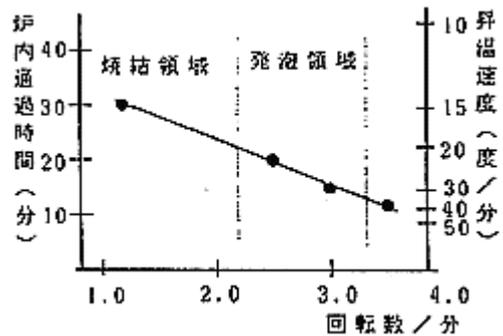


図4-5発泡領域と回転数、炉内通過時間
焼成温度：1150

市販品は JIS A 5002構造用軽量コンクリート骨材に規定されるM種に相当する。試作品は比重、吸水率では市販品と同等の性能を持ちJIS規M種に相当する。

試作骨材の評価結果を表2-4及び表2-5に示す。試作骨材は絶対比重が1.52(kg/cm³)と軽量骨材としてはやや大きく、またふるい分けによる粒5mm以下の割合がやや多くJIS規格値から外れていた。コンクリート

表2-3評価用試作骨材の原料配合

石材研磨スラッジ	20%
大久廃泥	65
浄水汚泥	6
下水焼却灰	4
コンクリートノ	5
微粉炭	2

試験結果は市販品とほぼ同等の性能であったが、単位容積質量が、市販品使用の結果と比較し若干大きい値を示した。

表2-4 骨材試験結果

項目	絶対比重 (g/cm ³)	表乾比重 (g/cm ³)	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/l)	
試作品	1.52	1.66	8.97	0.956	
市販品	1.30	1.42	8.82	0.816	
JIS値	H=1.5-2.0	-	-	-	
判定	H	-	-	-	
項目	実績率 (%)	塩化物 (%)	有機物 (%)	粘土塊 (%)	安定性 (%)
試作	62.9	0.001	標準<	0.12	1.3

表2-5 コンクリート試験結果

項目	フレッシュコンクリート		コンクリート	
	スランプ (cm)	単位容積質量 (kg/l)	7日強度 (kgf/cm ²)	28日強度 (kgf/cm ²)
試作品	9.0	1.984	396	535
市販品	9.0	1.902	416	522
JIS値	8±1.0	[19]=1.8~1.9		[400]=400以上
判定	-	19		400

3.1.4.b 湖沼底泥、スレート廃材等を原料とした例⁶⁾
大量に発生する霞ヶ浦底泥の有効活用化を考えるに当

たり、地域の産業界からも大量に発生し処理に困るスレート廃材、採石場廃泥、および石材研磨スラッジ等の無機系産業廃棄物をも合わせて活用し、土木、建築用に大量消費が見込める人工軽量骨材への試作研究を実施した。

底泥は、建設省が土浦市田村町付近で浚渫したもので、湖岸ヤード貯留底泥を採取し、フィルタープレスにて脱水後、乾燥粉碎したものを使用した。

スレート廃材は、石岡市アスク(株)で発生している廃材を破砕機で粗粉碎後さらにローラミルで微粉碎した。

砕石場廃泥は、いわき市大久産業(株)から排出されている山砂利採取時の水洗廃泥を使用した。

石材研磨スラッジは真壁町塙世石材工業団地のもの。

各原料の組成を図6-1及び表3-1に示す。スレート廃材を除いて発泡組成内に入っており、基本的に発泡軽量化に適した原料組成となっている。スレート廃材に含まれるCaO分は、高温で焼く窯業製品素地中では熔融材として働くため余り多くは配合できない。

表3-1 原料の元素組成

試料名	Ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Flax	CaO+MgO	K ₂ O+Na ₂ O
K 霞ヶ浦底泥	13.07	58.96	22.54	10.07	28.70	3.93	2.23
Su スレート廃材	20.25	27.92	4.61	2.41	67.89	65.27	0.21
D 砕石場廃泥	6.01	66.80	17.95	6.40	14.10	3.36	4.33
Se 石材スラッジ	1.74	1.25	69.15	14.61	26.02	4.65	6.76

試作骨材は、各原料を表3-2に示すように配合した。各配合ともガス発生物質として微粉炭及び酸化第二鉄をそれぞれ2%ずつ添加した。配合試料組成のプロットを図6-1に示した。

配合試料は、皿型造粒機を使い粒径5~15mmに造粒し、乾燥後融着防止材として蛙目粘土3%をまぶし、ロー

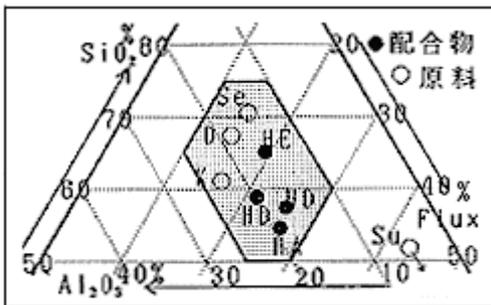


図6-1 産業廃棄物のRileyの組成範囲プロット

タリーキルンで焼成した。焼成温度は1120~1150℃、昇温速度は30℃/minで設定し、この時キルン回転数は3.0(rpm)、原料投入量は30(kg/hr)である。

焼成品の絶乾比重、吸水率、骨材粒の強度判定結果を表3-2に示す。

表3-2 試験結果総括表：原料配合及び焼成性状

試験項目	試料番号							
	K	HA-1	HA-2	HA-3	HB	HC	HD	HE
原料の調成	霞ヶ浦底泥	100	80		70	60	40	
	スレート廃材		20		10	10	20	10
	大久廃泥				10	30	40	65
	石材研磨スラッジ				10			25
配合比率%	SiO ₂	60.4	53.8		59.2	59.6	57.3	64.7
	Al ₂ O ₃	22.8	19.2		19.6	19.5	17.3	16.1
	flux	16.4	26.6		20.9	20.5	25.1	19.1
焼成性状	焼成温度	1100	1120	1130	1140	1130	1130	1130
	絶乾比重g/cm ³	0.62	0.82	0.78	0.52	0.86	0.97	1.25
	吸水率 (%)	7.4	8.8	14.0	17.3	7.8	7.0	8.9
	骨材強度							

霞ヶ浦底泥が60%以上配合された試料で、焼成温度1120~1150()が1.0(g/cm³)以下の超軽量骨材が得られた。また、試料HD,HEについても絶乾比重が1.3(g/cm³)以下の軽量骨材が得られ、市販されている人工軽量骨材[M]と同等品が得られた。

さらに試料HA-1については大量に試作を行い、詳細な骨材試験とコンクリート強度試験(JIS A 5002)を行い、市販人工軽量骨材(M社)と天然骨材である川砂利との性能を比較した。その結果を表3-3に示す。

底泥を活用した軽量骨材はJIS-A-5002に規定する軽量骨材、L種を満足し、かつコンクリート強度でも市販品(M)と同等の強度であった。粒強度は、破砕値荷重に示されるように小さいが、軽量化が進めば骨材中の気泡が多くなるためである。

表3-3骨材試験比較結果

骨材種類	分類	最大寸法(mm)	粗粒率	単位容積質量(kg/l)	絶乾比重	表乾比重	吸水率(%)	実積率(%)	10%破砕値加重(t)
試作品HA-1	粗骨材	15	6.24	0.50	0.83	0.90	8.84	60.9	1.7
市販品M	粗骨材	15	6.39	0.82	1.33	1.53	14.9	61.9	7.7
川砂利	粗骨材	15	6.62	1.61	2.51	2.57	2.07	64.1	19.1

3.1.4.c) 砕石場廃泥の例⁷⁾⁸⁾

コンクリート用砕砂生産工程中の水洗工程から排出される廃泥を活用し、軽量骨材の開発を行った。

元素組成分析の結果この廃泥にはSiO₂, Al₂O₃分に対しアルカリ成分が多く含まれている(表4-1)。

また、Rileyの発泡組成範囲に対しFe₂O₃が若干不足しているほかは、概ね発泡組成範囲にあった。

表4-1 岡本興業(株)砕砂工程廃泥の元素組成分析結果

Ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Flax	CaO+MgO	K ₂ O+Na ₂ O
5.39	66.64	14.15	4.11	16.52	6.28	6.13

軽量骨材用配合と焼成条件を検討するため、Rileyの発泡組成範囲を参考に表4-2に示す配合で発泡軽量化試験を行った。焼成温度の範囲は1150~1190()である。

試験結果の例を図7に示す。骨材の軽量化には炭素：1～6%，弁柄：1～3%の範囲が良好であり，焼成温度が高い方がより軽量の骨材が得られる傾向があった。

表4-2 軽量発泡化試験配合表：炭素 / 弁柄

試料No.	a- 0,1,3,6	B- 0,1,3,6	c- 0,1,3,6	d- 0,1,3,6
碎石場廃泥	1 0 0	1 0 0	1 0 0	1 0 0
炭素添加量(%)	0,1,3,6	0,1,3,6	0,1,3,6	0,1,3,6

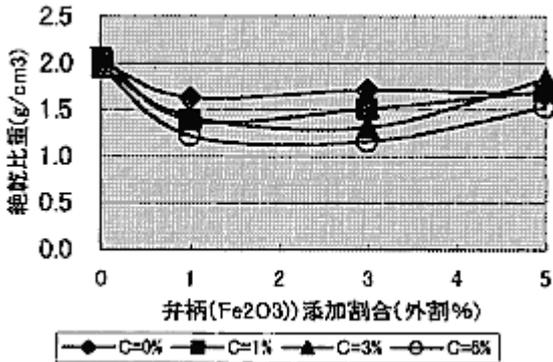


図7 碎石場廃泥 軽量発泡化試験結果
[焼成温度：1150]

配合試験結果をもとに軽量骨材の試作を行い，コンクリート用軽量骨材としての性能を評価するためコンクリート試験を行った。試作品は配合：廃泥に炭素を3%，弁柄を2%添加，配合：廃泥に炭素を3%，弁柄を4%添加したものをを用い，押し成形機で粒状に成形し，次に皿型造粒機で整粒を行った後，融着防止剤（蛙目粘土粉末）をコーティングし，棚型乾燥機で110℃，24hr乾燥後，表4-3の条件によりロータリーキルンで焼成した。

表4-3 ロータリーキルン運転条件

試作品No.	焼成温度(℃)	回転数(rpm)	傾斜角(度)	原料投入量(kg/hr)
	1130	6	2.5	3.5
	1120	5	2.5	3.5

試作試験結果を表4-4に示す。開発目標であったJIS規格M種の軽量骨材は製造できたが，最適と考えた絶乾比重1.3(g/cm³)よりも0.1程度低いものとなった。

表4-4 骨材試作試験結果

試作品No.	配合	焼成温度(℃)	絶乾比重(g/cm³)	吸水率(%)
		1130	1.16	14.1
		1120	1.13	13.2

試作軽量骨材及び市販の人工軽量骨材を用いコンクリート供試体の圧縮強度を測定した結果を表4-5に示す。

碎石場廃泥から開発目的の人工軽量骨材：JIS規格M種が製造できたが，その性能は市販品と比較してコンクリート供試体の圧縮強度はやや低い値であった。これは，試作品の絶乾比重が1.2(g/cm³)を下回ったためと考えられ，強度向上のために製造条件の検討が必要である。

表4-5 試作品の性能：コンクリート供試体

試料	単位体積質量(kg/m³)		圧縮強度(N/mm²)	
	絶乾	表乾	絶乾	表乾
試作品	1.80	1.88	32.5	29.2
試作品	1.83	1.88	29.5	26.8
市販品	1.91	1.94	42.0	36.2

4. 軟質骨材化技術

珪酸質産業廃棄物を素焼き程度の温度（800～1000℃）で焼成した物は，多孔性であり，吸水性，保水性に富むので水耕栽培用の培土や土壌改良材としての利用が考えられる。⁹⁾¹⁰⁾

廃泥等の廃棄物は，成型しにくい物が多く成型方法や成型助剤の検討及び焼成温度により多孔性及び吸水性等の性状が変化するため焼成条件の検討が必要である。

4.1 試験方法

4.1.1 成分分析

軽量骨材と同様の方法で分析した。

4.1.2 焼成試験

半乾式または湿式法により成型したテストピースを焼成温度を段階的に変えて焼成し，気孔率，吸水率，強度及び結合材の添加割合等を検討する。

4.2 実施例

4.2.1 石材研磨スラッジを原料とした粒状培土の例¹¹⁾

石材研磨スラッジを利用した粒状培土を製造するための成型助剤添加割合，焼成条件及び試作粒状培土の性状について検討した。

成型助剤としてベントナイトを0，1，3，5%の割合で添加し，乾式プレス成形によりテストピースを成形し，電気炉による酸化焼成で焼成温度とベントナイト添加割合に対する静水吸水率の変化及び摩耗減量について検討した。

焼成条件の検討結果を図8に示す。

焼成テストピースの吸水率は，各試料とも焼成温度の上昇に伴いやや減少する傾向が見られた。また，ベントナイトの添加割合の増加に伴い吸水率は減少した¹¹⁾。

摩耗減量は各配合とも焼成温度の上昇に伴い減少し，1000℃ではほぼ同じ値となった¹¹⁾。

また，ベントナイト添加の効果は焼成温度の低温側で大きい，1000℃付近では差異が見られなかった。

この結果から次に示す条件で粒状培土を試作した。

表5-1 粒状培土の試作条件

材料：研磨スラッジ + ベントナイト5%（外割）	
造粒：皿型造粒機	
焼成：ロータリーキルン（酸化）	
回転数：2 rpm	傾斜角：2.5
原料投入量：2.5 kg/hr	焼成温度 950

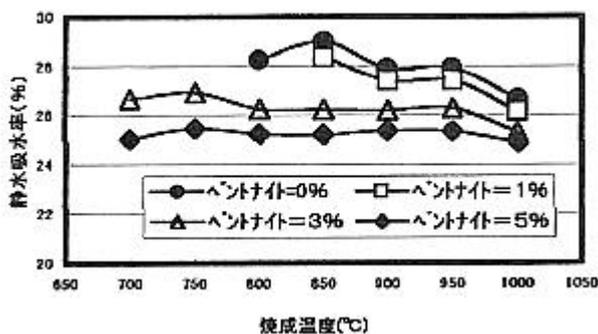


図8-1 焼成試験結果：静水吸収率

焼成した粒状培土は使用目的に合わせ、野菜育苗用資材：1～3、花卉鉢物用資材：3～4、4～6、6～10mm

の4種にふるい分け後、物性の評価を行った。結果を表5-2に示した。

また、試作培土のトマト、メロンの育苗、花壇苗類及びバラ溶液栽培の試験を果園芸研究所に依頼して行った。

トマト、メロンの育苗では、苗の生育は従来使用されているピートモス等と比較しやや劣ったほか、重量が重く、作業性が劣るとの問題点が提起された。バラ養液栽培は、普及しているロックウール栽培法と比較しほぼ同等の成績であった。¹²⁾

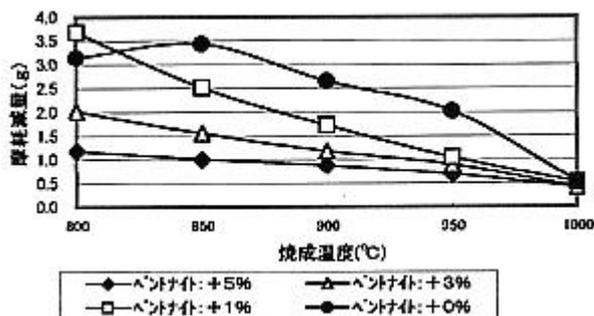


図8-2 焼成試験結果：摩擦減量

表5-2 試験粒状培土の物性の例

粒 径 (mm)	吸水率 (%)	表乾比重 (g/cm ³)	絶乾比重 (g/cm ³)	充填比重 (g/ml)
1 ～ 3	30.4	2.23	1.71	0.96
4 ～ 6	27.8	1.96	1.53	0.90

5. まとめ

産業廃棄物の活用方法の一つとして人工軽量骨材の製造技術の開発を行い、原料組成をRileyの発泡組成範囲に調整し、焼成時の昇温速度を20～35(/min)することにより人工軽量骨材が製造できた。

また、種々の無機系の産業廃棄物を原料として人工軽量骨材を開発を行い、この中で「特許人工軽量骨材の製造方法ほか」を出願(共同)したほか、構造用人工軽量骨材(比重1.32, JIS/M種, コンクリート強度500Kg達成, コスト¥15000/t)を開発できた。また湖沼底泥を利用し水に浮く超軽量骨材が開発できた。

産業廃棄物を原料として素焼程度の温度で焼成した多孔性に富む軟質骨材は、その高い吸水性、保水性を利用し、野菜の育苗や花きの養液栽培用の培土としてトマト、メロン、バラ栽培に有効である。

産業廃棄物の骨材化の利点は、大量消費が見込め、有害物質の封じ込めが可能であり、発生源の異なる廃棄物を一度に処理でき、各種骨材を同一工程で生産できる点である。しかし、製造コストが割高になり、製造した骨材は従来品との価格競争に耐えられず、また、現在開発した技術では、新規商品が開発できない欠点があり、現時点では企業化が行われていない。

[参考文献]

- 1) 表面化学 Vol.9, No6, P39
- 2) Cer. Soc., 34, P121, (1951)
- 3) 茨城県工業技術センター研究報告No.19, p54～p58 (1991)
- 4) 茨城県工業技術センター研究報告No.20, p110～p114(1992)
- 5) 茨城県工業技術センター研究報告No.21, p152～p154(1993)
- 6) 第6回世界湖沼会議 霞ヶ浦95' 論文集, p1687～p1690(1995)
- 7) 茨城県工業技術センター研究報告No.24, p64～p68 (1996)
- 8) 茨城県工業技術センター研究報告No.25, p65～p66 (1997)
- 9) 茨城県窯業指導所業務報告, 昭和54年度, p19～23
- 10) 茨城県窯業指導所業務報告, 昭和58年度, p16～20
- 11) 茨城県工業技術センター研究報告No.26, p48～p49 (1998)
- 12) 平成9年度花き試験成績書, P607～P610(1998), 茨城県農業総合センター園芸研究所花き研究室