

粘土とアルマイトスラッジを用いた複合材料焼成体の  
機械的性質の改善\*福本 功<sup>\*1</sup>, 銘苺春榮<sup>\*1</sup>, 松田次郎<sup>\*2</sup>Development of Mechanical Property of Fired Body of Composite Material  
Using Clay and Aluminum SludgeIsao FUKUMOTO<sup>\*3</sup>, Shunei MEKARU and Jiro MATSUDA<sup>\*2</sup> Department of Mechanical Systems Engineering, University of the Ryukyus,  
1 Senbaru Nishihara, Okinawa, 903-0213 Japan

Composite material mixed with Okinawa Kucha clay and the heat treated sludge which is an industry waste from sash factory was fabricated by compression molding and injection molding. These obtained results were as follows; (1) In the compression molding with no use of binders,  $\alpha$  alumina sludge particles inhibited the enlargement of numbers and size of pores caused by melting clay and the growing of pores when increasing the firing temperature. (2) The dimensional accuracy of fired body in injection molding was improved by increasing the content of sludge. (3) From the analysis of variance of bending strength, sludge content and injection pressure were specified as the significant factors on improvement of bending strength. The sludge particles perform the role of a reinforcement in the clay-sludge composite material. (4) By firing the body using micro wave sintering furnace, the sintering effect attributed to decrease the pores in the body comparing with the electric furnace. Especially, the bending strength improved drastically at the sludge content of 65%.

**Key Words:** Ceramics, Composite Material, Injection Molding, Clay, Sludge, Waste, Sintering, Recycle

## 1.緒言

一般にセラミックスの射出成形においては、工業的に精製された材料が用いられており、それらの材料は高純度で微粉末であるため高価格であることが、大きなネックとなっている。それに対し、窯業材料としての粘土は自然界に大量に賦存し、採掘性、輸送性の面において安価に利用できる条件下にある。ところで、沖縄県で大量に賦存するクチャ粘土（以下粘土と称す）を用いて、 $\mu$ mサイズの微粒子のみを抽出し射出成形に適用した結果、射出成形は十分可能であり<sup>(1)</sup>、さらにアルミナ粒子を複合化することにより機械的強度の高まる成形体を得ることが明らかになっている<sup>(2)</sup>。

本研究では、産業廃棄物の有効利用の立場より、アルミナ粒子の代替材料としてアルミサッシの表面にアルマイト処理で皮膜を形成する過程で大量に生じるアルマイトスラッジに熱処理を施し、 $\alpha$ アルミナの結晶構造をもつスラッジ<sup>(3)</sup>（以下 $\alpha$ スラッジと称す）の適用を試みた。

しかし、粘土に $\alpha$ スラッジを複合化した成形体は、工業的に精製された高純度、微粉末の粒子を用いた場合は異なり、品質や機械的性質が大きくばらつくことが予想される。そこで、本実験では基礎的データを得る目的で、熱処理を施した $\alpha$ スラッジを用いて粘土に複合化し、またバインダを用いない圧縮成形体を作製し、焼結体の気孔に及ぼす $\alpha$ スラッジ粒子の影響について検討した。その後、バインダを用いて射出成形に適用し、 $\alpha$ スラッジ粒子の材料特性を生かした最適成形条件について検討した。すなわち、射出成形は金型の転写性が要求されるため、ばらつきのない安定した品質と機械的強度の高まる成形体を得るため品質工学の手法<sup>(4)</sup>を用いて最適成形条件について検討した。

また近年、マイクロ波を用いてセラミックスの焼結に適用する試みがなされている。マイクロ波焼結の特徴は、エネルギー効率が低いという経済性に加えて、内部加熱による組織の微細化、均一化、緻密化等がある<sup>(5)</sup><sup>(6)</sup>。本実験においても、通常の電気炉加熱の場合と成形体の曲げ強さについて比較検討し、その効果の妥当性について検討を行った。

\* 原稿受付 2001年12月11日。

<sup>\*1</sup> 正員、琉球大学工学部(〒903-0213 沖縄県西原町千原1)。<sup>\*2</sup> 正員、産業技術総合研究所(〒305-8563 つくば市梅園1-1)。

E-mail: fukumoto@tec.u-ryukyu.ac.jp

## 2. 実験装置及び方法

射出成形に用いる粘土は、 $\mu\text{m}$ オーダーの微粒子が適するため、液相法を用いて粘土の微粒子のみを抽出した。その結果 $10\mu\text{m}$ 以下の微粒子が全体の約93%を占めている<sup>(2)</sup>。さらに、粘土内に存在する結晶水の有無が成形体の機械的性質に影響を与えるため<sup>(3)</sup>結晶水を取り除く目的で $1073\text{K}$ において30分間保持する仮焼成を行い実験材料とした。表1にクチャ粘土の化学組成を示す。またスラッジの化学組成を表2に示す。アルミナ成分は98%も含まれていることがわかる。またスラッジは、 $1573\text{K}$ で2時間保持することにより $\alpha$ アルミナの結晶構造に転移することから<sup>(4)</sup>熱処理を施した。得られた $\alpha$ スラッジの平均粒径は $7.33\mu\text{m}$ である<sup>(7)</sup>。粘土と $\alpha$ スラッジの配合比は種々変化させ、ボールミルを用いて8時間混合し圧縮成形と射出成形に供した。圧縮成形は丸本試料埋込みプレス(型式2426丸本工業(株))を用いて $20\text{MPa}$ で10分間保持し成形体を得た。また射出成形においては、双腕型ニーダを用いてバインダを添加した後 $423\text{K}$ で過熱乾燥を行い冷却の際粉砕してペレットを作製した。射出成形はセラミックス射出成形機(日精樹脂工業(株)PS10E1ASE)を用いた。尚、スクリー径( $16\text{mm}$ )を押し出し径と考え、スクリー径とノズル径( $2.5\text{mm}$ )の断面積から押し出し比を算出すると $97.6$ となる。脱脂炉はフィン社製(SKH-1)そして焼成は超高速昇温電気炉(モトヤマ(株)SB1415C)を用い、それぞれの条件は、過去の実験結果<sup>(8)</sup>を基に設定した。尚、焼成方法による通常の電気炉と比較としてマイクロ液焼結装置(富士電波工業(株)FMV-10-28)を用いて焼成体の機械的性質の比較検討を行った。成形体の評価は、比重測定はミラージュ貿易(株)の比重測定装置(EW-200SG)、硬度はマイクロピッカース硬度計(明石製MVK-G1)による硬さ試験、曲げ試験はオートグラフ試験機(島津製AG-50KND)を用いて支点間距離 $36\text{mm}$ 、荷重速度 $0.5\text{kN}/\text{min}$ として三点曲げ試験を行った。

## 3. 実験結果と考察

**3.1 複合材料の圧縮成形体における $\alpha$ スラッジの影響**  
セラミックスの機械的性質は、気孔の大きさ、形状、含有量などの形態に大きく左右される。またセラミックスの射出成形においては、バインダを用いることから、脱脂時の気孔の存在も機械的性質に大きな影響を与える。粘土においては、溶解、気孔の発生、成長、膨潤と独特の現象が生じるため、気孔の果たす役割は極めて大きい。そこで、粘土における焼結状態に着目し詳細に調べる目的で、まずバインダを使用しない圧縮成形に適用した。

またスラッジは $1573\text{K}$ で焼成すると $\alpha$ アルミナの結晶構造に転移することから、 $1573\text{K}$ で熱処理を施した $\alpha$ アルミナスラッジを用いた複合材料を作製して、焼成温度による気孔の変化と $\alpha$ スラッジすなわちアルミナ粒子の役割について検討した。なお本実験においては、粘土のみの場合と粘土に $\alpha$ スラッジを重量比で1:1に混合した成形体を焼成した。まず複合材料の機械的性質は成形体の気孔の存在に大きく影響を受けるため、表面部に残存する見掛けの空孔量として開気孔に着目した。簡便的に気孔率を知る方法として吸水率の測定がある。まず沸騰した湯に2時間浸漬し、その前後の重量変化を吸水率として求めた。焼成温度の変化による結果を図1に示す。

Table 1 Chemical composition of Kucha Clay (mass%)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Ig.loss
65.9	16.9	7.8	2.7	2.8	1.3	3.3	9.3

Table 2 Chemical composition of sludge (mass%)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	Ig.loss
0.99	91.20	0.30	0.02	0.21	0.72	6.56

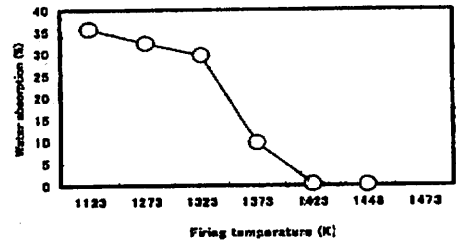


Fig. 1 Comparison of water absorption ratio when varying the firing temperature

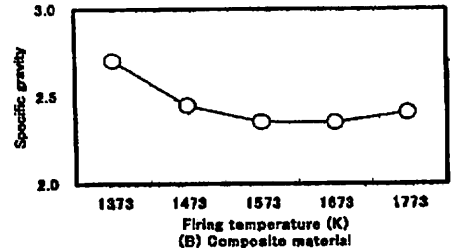
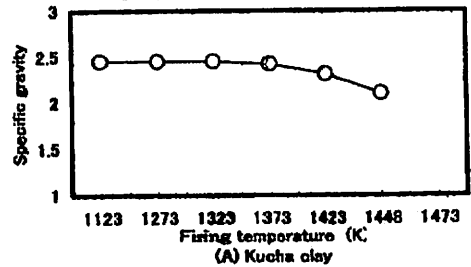


Fig. 2 Comparison of specific gravity when varying the firing temperature

粘土のみの場合は焼成温度 1323Kより吸水率は急激に低下し、1423Kで0の値を示した。これは、1423K以上の焼成温度においては、粘土中に含まれるガラス成分が溶解し、表面部の閉気孔が開孔したことを示している。次に、焼成体の内部の閉気孔も含む気孔の影響を知るために比重計を用いて成形体の比重を測定した。その結果を図2に示す。1373K以下の粘土のみの場合(A)は約 2.45 の安定した値を示すが、1423K以上において比重は低下する傾向にある。これは1423K以上においては、粘土が溶解し、閉気孔においては空孔に内在する空気の内圧が温度の上昇に伴い増加するため、閉気孔の膨張と増大の現象を生じ、また同様な現象に起因して新たな閉気孔の発生と成長が促進されるため、気孔量は全体として増大すると思われる。それに対し、 $\alpha$ スラッジ粒子を混合した複合材料の焼成体(B)は1673Kにおいては約 2.35 と安定した値を示す。これはクチャ粘土のみの結果と照らし合わせて考えると、1423K以上で粘土の溶解と気孔の増大が発生するが、 $\alpha$ スラッジはアルミナ成分で融点が高いことから、1423K以上においても物性的には安定しており、かつ粒子の状態が存在するため、 $\alpha$ スラッジ粒子が気孔の成長をある程度抑制する効果が発揮され1573Kにおいて安定し、比重は小さくなると思われる。しかし、1773K以上の温度においては、閉気孔の膨張を $\alpha$ スラッジ粒子が抑えることができず閉気孔となり、結果的には緻密になるため比重は増加するものと思われる。そこで、これらの気孔の存在と挙動が成形体の寸法にどのような影響を与えるか調べるため、金型の寸法に対する成形体の収縮率について検討した。その結果を図3に示す。粘土のみの場合(A)は1323K以上においては急激な収縮を示すが、これは粘土の液相焼結が進み緻密な構造になるためと思われる。それに対し、 $\alpha$ スラッジ粒子を混合した複合材料の焼成体(B)においては1473K以上において急激な収縮を示し、1573Kにおいて最も収縮量は大きく緻密になっており、また収縮率も $\alpha$ スラッジを複合化することにより粘土のみの場合と比較すると15%から約7%に減少しており大きく改善されていることがわかる。これはミクロ的には $\alpha$ スラッジ粒子により気孔の膨張を抑制する効果が、マクロ的には成形体の膨張を抑える効果を与えるため寸法は安定すると思われる。

**3.2 品質工学による射出成形体の最適成形条件の設定**  
セラミックスの射出成形は、バインダを用いた配合、混18通りの組み合わせのL18の直交表を用いて検討した。まず、成形体の内部は気孔が多く存在し、焼成温度の上昇に伴う気孔の発生、成長、増大の現象が生じ、またバインダの脱脂による気孔の新たな発生など、気孔による

線、射出成形、そして焼成のプロセスから構成されていることから、本研究では効率良く最適成形条件を見出すために品質工学の方法を適用した。まず各工程から過去の実験<sup>(2)</sup>を基に表3に示す因子と水準を選択し、かつ18通りの組み合わせのL18の直交表を用いて検討した。成

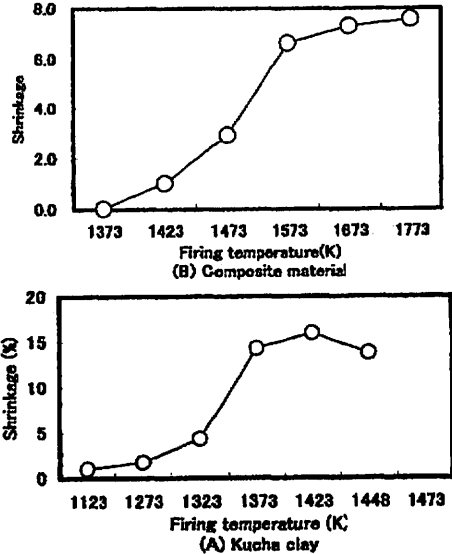


Fig.3 Comparison of shrinkage when varying the firing temperature

Table 3 Factors and levels in experimental design

Factor	Level		
	1	2	3
A Kneading time (h)	1	2	3
B Sludge content (%)	35	50	65
C Cylinder temperature (K)	373	393	413
D Injection pressure(MPa)	40	60	80
E Degreasing speed (K/h)	3	15	27
F Rising temperature (h)	1	2	3
G Firing temperature (K)	1473	1573	1673

Table 4 Result of specific gravity and SN ratio

No.	Specific gravity				$\eta$ (dB)
	1	2	3	4	
1	2.55	2.57	2.67	2.64	-8.24
2	2.11	2.15	2.21	2.14	-6.66
3	2.19	2.15	2.10	2.12	-6.61
4	2.39	2.58	2.57	2.52	-8.01
5	2.46	2.52	2.56	2.56	-8.05
6	2.52	2.62	2.61	2.57	-8.23
7	3.01	3.04	3.03	3.04	-9.63
8	2.24	2.92	2.70	2.73	-8.50
9	2.68	2.83	2.78	2.76	-8.83
10	2.59	2.64	2.58	2.73	-8.42
11	2.32	2.34	2.34	2.36	-7.38
12	1.97	1.92	1.97	2.01	-5.88
13	2.71	2.77	2.78	2.85	-8.87
14	2.45	2.50	2.39	2.41	-7.74
15	2.73	2.63	2.55	2.46	-8.28
16	2.77	2.78	2.83	2.79	-8.92
17	3.09	3.09	3.03	3.07	-9.74
18	2.48	2.71	2.82	2.74	-8.60

形体の内部は気孔が多く存在し、焼成温度の上昇に伴う気孔の発生、成長、増大の現象が生じ、またバインダの脱脂による気孔の新たな発生など、気孔による影響は極めて大きい。焼成体の比重について検討を行った。まず、目標とする比重の特性値を軽い程望ましいとする望小特性として、測定値をSN比<sup>(6)</sup>に変換した結果を表4に示す。また分散分析の結果を表5に示す。表中のfは自由度、Sは変動、Vは分散、F<sub>0</sub>はF値、ρは寄与率を示す。尚、表中の○印の付いた因子はまとめてプーリングして誤差因子として分散分析に用いた。F検定の結果、1%の危険率でαスラッジ含有量とシリンダー温度と脱脂速度が有意(表中で\*\*で表示)で、5%の危険率まで含めると、射出圧力、昇温時間、焼成温度の因子も有意(表中で\*で表示)となる。これらは、αスラッジ含有量による重量変化、また成形条件、脱脂条件、焼成条件が成形体の空孔の発生、成長に大きく影響を与えていることがわかる。そこで、これらの成形体の空孔の変化が成形体の寸法精度にどのような影響を与えるか検討した。すなわち、射出成形では金型の転写性が極めて重要なため、また目標特性として目標とする寸法が存在することから、望小特性<sup>(6)</sup>を選択して成形体の寸法のばらつきについて検討し、その結果を表6に示す。データは、1本の成形体から3箇所直径を測定し、かつ4本の成形体について測定し平均を求めた。この際、成形条件によっては、焼成体が折れたり、曲がり変形する等して測定が不可能のデータ、欠そく値が生じた。そこで、データに欠そく値が生じた場合は-3dBの処理を行った。寸法精度に対する分散分析の結果を表7に示す。F検定の結果、5%の危険率においてαスラッジ含有量と脱脂速度の因子が有意と認められた。そこで、αスラッジ含有量と脱脂速度の因子の水準別のSN比の比較を図4に示す。脱脂速度が遅い程、またαスラッジ含有量が増加する程SN比は高くなり、寸法精度は向上しばらつきは抑制されることがわかる。すなわち、脱脂の過程において脱脂速度が遅い場合は形状の保持がなされるが、脱脂速度が速くなる場合においてはバインダの蒸発に伴う空洞の発生と亀裂の成長が短時間でなされるため、亀裂の合体や空孔の合体がなされやすいため成形体の形状の崩れを生じやすい。その際、成形体の内部に硬質のアルミナ成分であるαスラッジ粒子を含有する場合にはαスラッジ粒子が粘土中に分散しているため形状の崩れを防ぐ役割を果たし、またαスラッジ含有量が増加するとその効果は高まると思われる。次に、αスラッジ含有量(B)と脱脂速度(E)の2因子で寸法精度を推定すると最適条件ではB<sub>50</sub>E<sub>3</sub>、すなわち、スラッジ含有量50%、脱脂速度3K/hで推定すると、図4より

Table 5 Analysis of Variance of specific gravity

Factor	f	S	V	F <sub>0</sub>	ρ
A	1	0.06	0.06 <sup>○</sup>	1.5	
B	2	10.16	5.08	127**	58.3
C	2	2.83	1.41	35.25**	16.0
D	2	0.70	0.35	8.75*	3.7
E	2	1.75	0.87	21.75**	9.7
F	2	1.11	0.55	13.75*	6.0
G	2	0.51	0.26	6.5*	2.5
A×B	2	0.02	0.01 <sup>○</sup>	0.25	
○pooling	5	0.20	0.04		

Table 6 Result of diameter of fired body and SN ratio

No.	Diameter (mm)				η (dB)
1	4.832	4.835	4.815	4.817	53.5
2	5.220	5.172	5.495	5.198	30.9
3	5.622	5.417	5.282	-	30.0
4	4.945	5.128	5.033	5.038	36.8
5	5.215	5.035	5.235	5.190	35.1
6	4.858	4.860	4.908	4.857	45.8
7	4.715	4.735	4.725	4.717	54.3
8	5.478	5.485	5.433	5.425	45.0
9	5.120	5.107	5.145	5.132	50.0
10	4.940	4.878	-	-	41.0
11	5.137	5.015	5.085	5.143	38.7
12	5.495	5.768	5.455	5.335	29.6
13	4.858	4.775	4.800	4.860	41.1
14	5.200	5.173	5.127	5.150	44.4
15	5.087	5.063	5.055	5.027	46.2
16	4.862	4.882	4.857	4.892	49.4
17	4.753	4.745	4.848	4.743	39.5
18	5.343	5.372	5.310	5.332	46.3

Table 7 Analysis of Variance of dimensional accuracy

Factor	f	S	V	F <sub>0</sub>	ρ
A	1	1.39	1.39 <sup>○</sup>	0.06	
B	2	372.25	186.13	8.16*	30.3
C	2	136.45	68.23	2.99	
D	2	61.84	30.92 <sup>○</sup>	1.36	
E	2	268.69	134.34	5.89*	20.7
F	2	66.59	33.29 <sup>○</sup>	1.46	
G	2	96.49	48.25	2.12	
A×B	2	69.69	34.84 <sup>○</sup>	1.53	
○pooling	9	205.26	22.81		

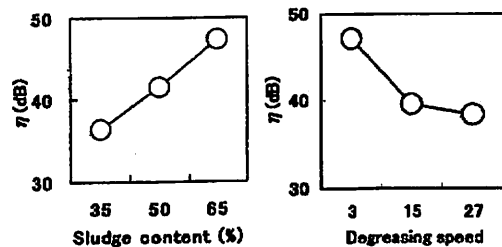


Fig. 4 Comparison of SN ratio in each level of factors of sludge content and degreasing speed

$$\mu = B_3 + E_1 - T = 47.4 + 47.2 - 41.8 = 52.8 \quad (1)$$

(但しTはSN比を求めた際の総平均値)

よって、52.8dB(分散5.24)となり、また各因子のSN比の高い水準だけを取り出した最適成形条件 A<sub>1</sub>B<sub>3</sub>C<sub>1</sub>D<sub>1</sub>

E<sub>1</sub>F<sub>1</sub>G<sub>1</sub>で8本の試験片を用いて確認実験を行うと50.9dB(分散8.12)が得られ、その差は1.9dBで良く一致している。このことは最適化することによって分散を現状より約1/2に抑制したことを示している。

次に、機械的強度として成形体の曲げ強さについては大きい程望ましいことから望大特性<sup>(8)</sup>として検討を行い、その結果を表8に示す。この場合も欠そく値が生じたため、その場合は-3dBの処理を行った。分散分析結果を表9に示す。これより、αスラッジ含有量と射出圧力の因子が有意と認められた。そこで、それぞれの水準別の比較を図5に示す。これより、αスラッジ含有量が増加する程SN比は高まり、強度の向上に寄与することがわかる。これは粘土内にαスラッジが均一に分散することにより強化材の役割を果たし、亀裂の発生、進展を阻止する作用があるため曲げ強さの向上に寄与したと思われる。その結果、αスラッジ含有量が増加すると、曲げ強さが向上すると考えられる。次に、射出圧力においては、圧力が不必要に高すぎると十分なガス抜きがなされないまま材料の金型への充てんがなされるため、空気を巻き込み、成形体内部に空孔を形成するため曲げ強度の低下を招くと思われる。

そこで、有意と示されたαスラッジ粒子(B)と射出圧力(D)の因子を用いて現行の条件B<sub>1</sub>D<sub>2</sub>で曲げ強さを推定すると、図5より、

Table 8 Result of bending strength

No.	Bending strength (MPa)				η (dB)
1	86.46	86.74	99.09	99.69	39.6
2	81.26	72.32	56.06	59.91	36.3
3	45.26	34.33	29.85	-	30.9
4	133.8	103.14	106.17	114.6	41.0
5	66.48	75.91	78.61	72.61	37.3
6	109.76	104.35	104.87	105.98	40.5
7	158.55	161.39	165.37	168.0	44.3
8	63.94	53.91	57.44	59.14	35.3
9	88.71	99.83	99.84	96.19	39.6
10	37.92	36.75	26.11	-	30.1
11	117.08	92.35	76.15	82.83	39.0
12	20.78	18.34	27.69	23.69	26.8
13	136.81	112.12	145.1	178.71	42.8
14	68.1	129.06	-	-	38.6
15	101.65	85.35	110.47	89.68	39.6
16	106.7	155.35	160.31	132.49	42.5
17	227.95	215.49	184.12	150.19	45.4
18	79.66	77.61	93.27	74.08	38.2

$$\mu = B_1 + D_2 - T = 32.8 + 37.6 - 37.7 = 32.7 \quad (2)$$

(但し、TはSN比を求めた際の総平均値)

32.7dBが得られ、最適条件B<sub>3</sub>D<sub>1</sub>では、

$$\mu = B_3 + D_1 - T = 40.9 + 40.7 - 37.7 = 43.9 \quad (3)$$

43.9dBとなり利得の改善は11.2dBとなる。次に、確認実験においては、現行A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>C<sub>2</sub>D<sub>2</sub>E<sub>2</sub>F<sub>2</sub>G<sub>2</sub>では37.9dB、最適条件A<sub>2</sub>B<sub>3</sub>C<sub>1</sub>D<sub>1</sub>E<sub>1</sub>F<sub>2</sub>G<sub>2</sub>では43.7dB利得の改善は5.8dBとなり、十分な再現性は得られなかったが、利得が大幅

Table 9 Analysis of Variance of bending strength

Factor	f	S	V	F <sub>0</sub>	ρ
A	1	1.33	1.33 <sup>○</sup>	0.16	
B	2	223.93	111.97	13.39*	39.6
C	2	53.03	26.52	3.17	
D	2	103.94	51.97	6.22*	16.7
E	2	29.68	14.84	1.78	
F	2	12.74	6.37 <sup>○</sup>	0.76	
G	2	53.65	26.83	3.21	
A×B	2	26.28	13.14 <sup>○</sup>	1.57	
pooling	7	58.56	8.36		

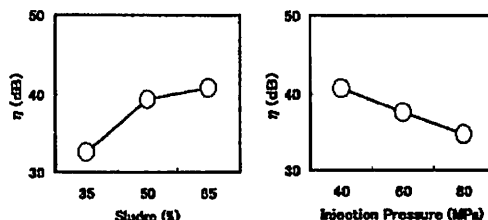


Fig.5 Comparison of SN ratio in each level of factor of sludge content and injection pressure.

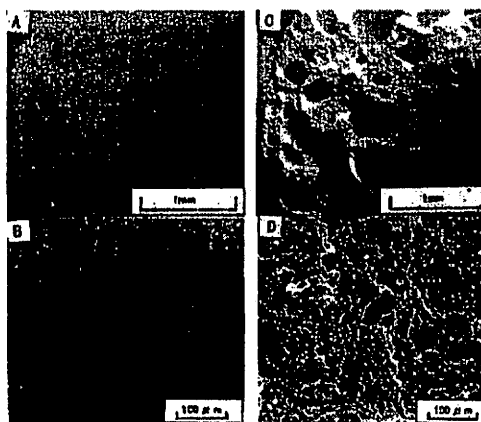


Fig.6 SEM photographs of fracture surface in bending test.

に改善されていることから曲げ強度に及ぼすαスラッジ含有量と射出圧力の因子の有効性が確認された。

次に、αスラッジ粒子の含有量が気孔の成長を抑制する効果を定性的に把握するため、曲げ破断面を走査型電子顕微鏡で観察を行った。その結果を図6に示す。図中A、Bはスラッジ含有量65%、曲げ強度184MPaの破断面を示し、C、Dはスラッジ含有量35%曲げ強さ57MPaの破断面を示す。A、Cはマクロ観察、B、Dはミクロ観察を示す。マクロ観察においては、Aの65%の場合は比較的平面的で中心部に気孔が存在するものの、全体としては気孔も小さくその数も少ない。それに対し、35%の場合

は、気孔も大きく、その数も多い。ミクロ観察では、65%のBでは、破断面はほとんど平坦であり、気孔も小さく緻密な構造になっている。それに対し、35%のDでは、気孔は大きく膨張し、層が重なりあったような山のような形状を呈しており凹凸の状態となっている。このことから、 $\alpha$ スラッジの含有量が多いほど成形体の気孔の増大による欠陥が抑制され、曲げ強さは増加すると思われる。

### 3.8 マイクロ波焼結による焼成体の曲げ強さの改善

産業廃棄物であるスラッジは熱処理と最適成形条件を適切に設定することにより安定した強度と品質を得ることができるが、さらなる付加価値を高めることを目的として、機械的強度の高い成形体を得るためにマイクロ波焼結に供した。マイクロ波焼結はジャイロトン発信管を用いて28GHzの周波数を発信することによりなされ、アルミナ等の誘電損失の低い材料でも、吸収エネルギーが周波数に比例することを利用して容易に均一加熱することができる<sup>(9)</sup>。本実験では設定温度に1時間30分で加熱するよう制御し、設定温度に5分保持した。比較のため通常の電気炉を使用する場合は設定温度に2時間で昇温加熱し、2時間の保持を行っている。曲げ強さの比較検討した結果を図7に示す。図より焼成温度1573Kにおいて、マイクロ波焼結を行った焼結体はスラッジ含有量65%の場合205MPaとなり、電気炉より高い曲げ強さを示した。そこで、曲げ破断面のSEM観察を行ったが、明瞭な差異は認められなかった。しかし、成形体の気孔が影響していると考えられることから、成形体の比重を測定し比較検討を行った。その結果を図8に示す。図よりスラッジ65%において、マイクロ波焼結体において比重は最も大きい値を示している。このことは、マイクロ波焼結を行うことにより、粒子間の焼結がスムーズになされ緻密な構造になるため、気孔量は減少し、かつ成形体の内部に欠陥が減少するため、結果的に曲げ強さが向上したと思われる。

## 4. 結言

クチャ粘土に産業廃棄物のアルマイストラッジを熱処理した $\alpha$ スラッジを複合化し、圧縮成形と射出成形に適用し、成形体の品質と機械的強度に及ぼす因子について検討を行った結果、次のことが明らかとなった。

- 1) 圧縮成形体においては、 $\alpha$ スラッジ粒子が焼成温度の上昇による粘土の溶融、気孔の成長による膨張変形を抑制する効果が認められた。
- 2) 射出成形体の寸法精度は、高温における粘土の溶融、気孔の発生、成長に伴う成形体の膨張現象を $\alpha$ スラッジ粒子が抑制するため、 $\alpha$ スラッジ含有量が多い程寸法精

度が安定することがわかった。

- 3) 射出成形体の曲げ強さにおいては、分散分析の結果、 $\alpha$ スラッジ含有量と射出圧力の因子が有意と認められ、スラッジ粒子が強化材の役割を果たすことが認められた。
- 4) マイクロ波焼結を施すことにより、通常の電気炉の場合に比較して、焼成体の焼結はスムーズになされ、かつ気孔が減少することより、曲げ強さは向上することが認められた。

最後に、本研究を進めるに当たり、琉球大学大学院学生の新垣栄樹、本末雄介、卒研生の上斐文和君らの協力を得た。また、本研究を進めるに当たり、軽金属学会より研究補助金を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

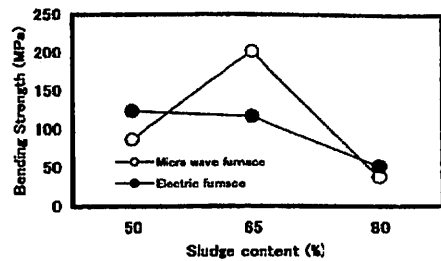


Fig.7 Relation between bending strength and firing temperature

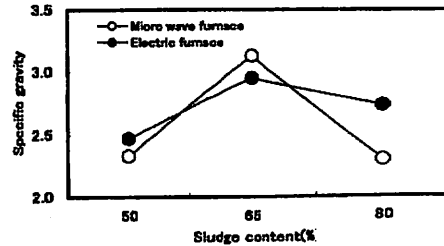


Fig.8 Comparison of specific gravity between electric furnace and micro wave furnace

## 文献

- (1) I.Fukamoto and S.Mekaru;JCOPE-95,496-499(1995).
- (2) 橋本, 岡田, 与座; 日本セラミックス協会学術論文集, 108, 8 (2000) 763.
- (3) 橋本, 与郎嗣; 軽金属 46, 11 (1996) 564.
- (4) 松田, 小池, 田中; 成形加工 6, 7 (1994) 496.
- (5) T.T.Meeck, R.D.Blake & J.J.Petrovic; Ceram. Eng. Sci. Proc., 8(1987)861.
- (6) 福島, 渡辺, 松井; 精密工学会誌 58, 1 (1992) 75.
- (7) 橋本, 銘珂; 成形加工 12, 10 (2000) 662
- (8) 田口, 横山; 実験計画法, 日本規格協会 (1987) 148.
- (9) 福島, 山中, 真, 松井; 精密工学会誌 54, 2 (1988) 305.