# 機能性セラミックスのマイクロ波焼結

福島英沖,渡辺吾朗,森広行,松居正夫

# **Microwave Sintering of Electronic Ceramics**

Hideoki Fukushima, Goro Watanabe, Hiroyuki Mori, Masao Matsui

#### 要 旨

マイクロ波加熱は,材料内部からの自己発熱を利用しているため,急速加熱,選択加熱,内部加熱など, 従来の外部加熱方式にはない多くの特徴をもっている。

当所で開発した,エネルギー効率の高い単ーモード空胴共振器を具備したマイクロ波加熱制御装置を 用いて,機能性セラミックスの焼結を試みた。さらに応用例として,ZnOバリスタ及びアクチュエータ 用PZTセラミックスをマイクロ波焼結し,得られた焼結体の電気的,機械的特性及び微構造を調査し, 従来の電気炉焼結体と比較した。

ZnOバリスタでは,マイクロ波焼結した方が電気炉焼結よりも非直線係数の大きな焼結体が得られた。 また,PZTセラミックスでは,低温・短時間焼結で高密度かつ微細組織が得られ,高強度化が達成され た。さらに,焼結性が促進されるために,微細粒径でも圧電性や誘電性の優れた焼結体が得られた。

このように,マイクロ波焼結は低温・短時間焼結に特徴があり,従来の電気炉焼結に比べて高強度で 高機能なセラミックスを焼結できる可能性のあることがわかった。

#### Abstract

Microwave heating offers advantages over conventional technologies such as rapid heating, internal heating and preferential heating. Microwave sintering of ceramics was performed using the heating control system and single mode cavity developed for this study. This study investigates the feasibility of the microwave sintering for electronic ceramics, e.g. ZnO varistors and PZT, in terms of densification, microstructure, mechanical and electric properties.

ZnO varistors sintered by microwaves indicated higher nonlineality factors than those sintered by a conventional process using an electric furnace. PZT obtained by microwave sintering had a high strength due to its high density and small grain size compared with that obtained by conventional sintering. Furthermore, since the sintering reaction of PZT ceramics was accelerated by microwave radiation, they also had high electric properties.

Thus, the microwave sintering is characterized by a low sintering temperature and a short soaking time and can be expected to sinter ceramics with both high strength and high electric properties.

キーワード

研究報告

マイクロ波焼結,急速加熱,単一モード共振器,機能性セラミックス,ZnOバリスタ,PZT,電気的特性, 微構造,焼結体強度

# 1. はじめに

セラミックスのマイクロ波加熱は1980年代初期に米 国を中心に始まり,近年,焼結や接合への利用が検討 され<sup>1)</sup>,我が国においてもこの分野の研究が盛んにな ってきている<sup>2)</sup>。マイクロ波加熱は,マイクロ波電力 を誘電体に吸収させて誘電体内部より自己発熱させる 方法である。このため,熱伝導や輻射による従来の炉 加熱方式に比べて急速加熱が可能で,しかも熱効率が 高いため短時間で加熱処理が行える。この方法をセラ ミックスの焼結に利用した場合,焼結体組織の微細化, 均一化,緻密化が促進され,焼結体の機械的,電気的 特性の改善が期待できる。

本稿ではまず,マイクロ波加熱の原理,特徴にふれ, 当所で試作したマイクロ波加熱制御装置について述べ る。さらに,その装置を用いて各種セラミックスの焼 結性を調べ,機能性セラミックスを焼結した応用例と して,ZnOバリスタ及びアクチュエータ用PZTセラミ ックスを取りあげ,得られた焼結体の電気的,機械的 特性及び微構造を調べ,従来の電気炉焼結体と比較し た結果について報告する。

# 2. マイクロ波加熱の原理,特徴

電気的に絶縁された誘電体をマイクロ波の電界中に 置くと,誘電体を構成している双極子(又は空間電荷) がマイクロ波の電場により激しく振動・回転し,その 摩擦熱のために誘電体自身が発熱される。このとき, 誘電体(被加熱材)に吸収されるエネルギーPは次式 で与えられる<sup>3)</sup>。

$$P = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon'' \omega E^2 V s \tag{1}$$

但し, $\varepsilon_0$ は真空の誘電率, $\varepsilon$ "(= $\varepsilon_r$ tan $\delta$ )は誘電体の 誘電損率( $\varepsilon_r$ :比誘電率,tan $\delta$ :誘電正接), $\omega$ は角周 波数,Eは電界強度, $V_s$ は誘電体の体積である。

誘電損率ε"は温度,周波数などによって変化し,特 に,セラミックスなどの高温で使用する材料をマイク 口波加熱する場合,高温での誘電特性を知ることが重 要となってくる。一般に,セラミックスの誘電損率ε" は常温では小さいが,温度の上昇とともに急激に増加 する。Fig.1はアルミナ焼結体をマイクロ波で直接加 熱しながらε"を測定した例である<sup>4)</sup>が,ε"は温度の上 昇とともに指数関数的に増大し,1800°C付近では常温 の100倍以上にもなる。このことから,一旦加熱が始 まると,エネルギーの吸収効率が高くなり,あまり大 きなエネルギーを必要とせずに急速に加熱できる。

マイクロ波加熱は,材料内部からの自己発熱を利用 しているため,急速加熱,選択加熱,内部加熱など, 従来の外部加熱方式にはない多くの特徴をもってい る。これらの特徴をセラミックスの焼結に適用した場 合,短時間焼結による省エネルギー性のほかに,組織 の微細化による焼結体の強度向上,急速加熱または内 部加熱による焼結体の緻密化促進, ε"の違いを利用し た選択加熱による新しい機能材料の創製,等が期待で きる。しかしながら反面,局部加熱により加熱むらが 発生する場合や,試料寸法が限定されるなどの問題も あり,これらの問題点をいかに解決してマイクロ波加 熱の特徴を生かすかが,本焼結法のポイントとなる。

### 3. マイクロ波加熱制御装置

セラミックスをマイクロ波焼結するときに用いる加 熱室としては,電子レンジのように多数の電磁界モー ドが存在するマルチモード共振器と,電磁界を一カ所 に集中させたシングルモード共振器の2つのタイプが ある。特に,機能性セラミックスのように比較的小さ い形状の場合は,後者の共振器を用いた方が小さな電 力で高効率に加熱できる。しかしながら前述したよう に,セラミックスの比誘電率と誘電損率は温度の上昇 とともに変化するため,共振器内の共振周波数と結合 度が変化し,加熱中に共振を維持するための制御が必 要となる。

そこで我々は, Fig. 2に示すようなシングルモード の直方体空胴共振器(キャビティ)を用いたマイクロ 波加熱制御装置を開発した<sup>5</sup>)。試料はキャビティ内の 電界の最大箇所に置かれ,マイクロ波加熱または焼結 される。キャビティには可変のアイリス(結合窓)と プランジャ(可変短絡板)を備え,加熱中でも共振を 維持するとともに,反射電力を零に近い状態にできる ようにしている。本装置は,周波数2.45GHzまたは



Fig. 1 Temperature dependence of dielectric loss factor of 92% alumina measured at 6GHz.

6GHzのマイクロ波発生器を用い,加熱温度の上昇に ともなう誘電特性の変化に応じてプランジャとアイリ スを制御し,さらに加熱温度をマイクロ波出力で制御 している。その結果,常時共振を維持しながら所定の 加熱速度,加熱温度で焼結が行え,±10°Cの温度精度 で90%以上のエネルギー効率が得られる<sup>6</sup>。

# 4. 各種セラミックスの焼結性

セラミックス粉末は、Table 1に示すようなAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, AlN,TiO<sub>2</sub>,安定化ZrO<sub>2</sub>,ZnO,PZT,PLZT,BaTiO<sub>3</sub> の8種類を用いた。焼結には添加剤を用いず原料粉末 をそのまま使用し、 $\phi$ 6.6mmの円柱状に成形した試料 を用いた。いずれの試料も室温から一定の加熱速度 で昇温(約300°C/min)し、所定の焼結温度で5min保 持した後、一定の速度で冷却した。マイクロ波加熱装



Fig. 2 Single mode rectangular cavity for microwave sintering.

Powder	Theoretical density g/cm <sup>3</sup>	Powder size mm	Chemical composition wt%	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.99	0.2	> 99.99%	
AlN	3.26	1.8	N: 33.4%, O: 1.78%	
TiO <sub>2</sub>	4.25	1 – 2	> 99.9%	
$ZrO_2^*$	5.90	0.3	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 13.67%	
ZnO	5.78	<1.0	> 99.9%	
PZT	8.0	1	Pb(Nb <sub>2/3</sub> Ni <sub>1/3</sub> )O <sub>3</sub> -Pb(Zr <sub>0.33</sub> Ti <sub>0.67</sub> )O	
PLZT	7.8	1 – 2	$Pb_{0.92}La_{0.08}(Zr_{0.65}Ti_{0.35})O_3$	
BaTiO <sub>3</sub>	6.0	1.1	> 99.7%	

 Table 1 Major properties and chemical compositions of ceramic powder.

\* Stabilized zirconia

置は周波数6GHzのものを用い,出力は約40Wであった。また,焼結時の雰囲気は,大気中またはN<sub>2</sub>ガス中とした。

Fig. 3に, マイクロ波焼結したときの各種セラミッ クスの焼結体密度を示す。いずれの試料も,大気中で 焼結した方が密度は上がり, ZnO, ZrO, では粉末真比 重と同等の焼結体が得られた。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>では, 大 気中で焼結することにより真比重の90%以上のものが 得られたが, 試料の一部が溶融して結晶粒が粗大化し, 部分的に不均一な組織がみられた。一方, AINは高温 に加熱しても緻密化されず,密度は焼結前と変わらな かった。しかし, AINは均一加熱が可能であるため, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>などの焼結助剤を添加することにより,マイク ロ波焼結でも緻密なAIN焼結体を得ることができると 思われる。さらに, PZT, BaTiO3ではランナウェイ現 象により局部加熱が生じ,その部分が破壊または溶融 し,焼結は困難であった。ランナウェイとは,材料中 に極端に誘電損率の大きな部分があると,その部分に マイクロ波エネルギーが集中する現象である<sup>3</sup>)。PZT などの材料は,誘電損率の温度依存性が大きく,熱伝 導率が低い材料であるため,マイクロ波加熱中に不均 ーな温度分布ができ,その結果このような局部加熱が 生じたものと思われる。

Fig. 4は,マイクロ波焼結が容易であったZnO粉末 において,焼結温度と焼結体密度の関係を示している。 620°Cでは焼結はまだわずかしか進行せず,加熱前と 似た組織であるが,840°C以上になると急激に緻密化



Fig. 3 Density of several ceramics after microwave sintering for 5min at 6GHz.

が進み焼結体も黄色を帯びてくる。1180°Cでは相対密 度97%以上のものが得られ,1320°Cでは真比重に等し い焼結体が得られた。このときのZnO焼結体は気孔の ない均一な組織になっており,さらに,焼結保持時間 5秒の極短時間焼結でも相対密度95%以上で粒子の細 かい焼結体が得られた<sup>7</sup>。

### 5. ZnOバリスタの焼結

前述したように,ZnOはマイクロ波焼結が容易であったので,さらにバリスタ特性を得るために数種類の添加剤を加えてマイクロ波焼結を行った<sup>8)</sup>。ZnO粉末に添加剤(Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,Co<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,MnO<sub>2</sub>,Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)を加

えて円柱状( $\phi$ 9×7mm)に成形後マイクロ波焼結し, 焼結体の密度,粒径,バリスタ電圧,非直線係数 $\alpha$ を 測定し,従来法である電気炉焼結と比較した。その結 果をTable 2に示す。マイクロ波焼結によってもZnO バリスタを得ることが可能で,短時間の焼結で電気炉 焼結体と同等の密度が得られた。さらに,マイクロ波 焼結した方が電気炉焼結体よりも $\alpha$ 値は大きく,優れ た電気特性を示した。同様に,バリスタ電圧もマイク ロ波焼結の方が高くなっているが,これはFig.5に示 すように,電気炉焼結よりも結晶粒径が小さくなった ことによるものと思われる。

Fig. 6に各種酸化物の誘電特性を示す<sup>ッ)</sup>。ZnOバリ



Fig. 4 Relation between temperature and density of ZnO sintered by microwave for 5min.

Sintering condition	Density g/cm <sup>3</sup>	Grain size µm	Breakdown voltage V/mm	Non- linearity $\alpha$
Microwave				
1150°C × 5min	5.59	1~5	521	34
1150°C × 10min	5.62	1~5	503	38
1350°C × 5min	5.63	5 ~ 10	294	27
Conventional				
1150°C × 1h	5.67	5 ~ 10	300	22
1350°C × 1h	5.62	5 ~ 15	54	4

 Table 2
 Properties of ZnO varistors sintered by microwave and conventional process.



(a) Microwave sintering for 5min



(b) Conventional sintering for 1h

Fig. 5 Microstructure of ZnO varistors sintered at 1150°C.

スタの添加剤として用いたCo<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO<sub>2</sub>はZnO単味よ りも桁違いに誘電損率 ε"が大きく,Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>は逆に他の 添加剤よりも極めて小さな値となる。このことから, 蒸気圧の高いSb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>よりも蒸気圧の低いCo<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO<sub>2</sub> が優先的に加熱され,その結果,マイクロ波焼結では 蒸気圧の高い添加剤の蒸発が抑制されると考えられ る。一方,従来の電気炉焼結法は高温長時間の加熱で あるため,蒸気圧の高い添加剤が蒸発し,そのためマ イクロ波焼結よりもバリスタ特性が低下したものと思 われる。

6. PZTセラミックスの焼結

6.1 均一焼結法

PZTセラミックスは,前述したように,通常のマイ クロ波加熱では局部的に加熱むらが生じる。この加熱 むらを防止する方法として,Fig.7に示すように,板 状のPZT試料をマイクロ波吸収性の良いSiC板で挟ん で加熱することにより均一に焼結することが可能とな る<sup>10</sup>。SiC板を用いることにより加熱むらを防止でき たのは,SiCのマイクロ波吸収性が高いのに加えて, SiCがPZTよりも誘電損率の温度依存性が小さく熱伝 導率の大きな材料であるからと考えられる。このため, PZTの誘電損率の急激な変化を緩和し,試料温度に不 均一部分がなくなり,PZTを均一に加熱することがで きたものと思われる。また,SiC板とPZT試料を直接 接触させると高温下でこれらが反応して接触面同士が 付着し,試料表面が変質するため,PZTとSiCの間に



Fig. 6 Dielectric properties of ceramic powders measured at 6GHz.

絶縁体としてアルミナ板を挟んだ。さらに,試料全体 を低損失な石英管で覆うことにより,高温でも安定し た焼結が行えるようになった。また,直径の大きな円 板試料を焼結するためには,キャビティを大きくする 必要があるため,周波数2.45GHzの装置を用い,キャ ビティも大型化した。

このようにして,マイクロ波吸収体(SiC板)のほかに,絶縁体(アルミナ板)と低損失体(石英管)を用いることによりPZTの焼結性が向上し,Fig.8に示すように,直径ø16mm以上の均質なPZT焼結体が得られるようになった。以下に,この装置を用いてPZTセラミックスをマイクロ波焼結したときの焼結体特性と微構造について述べる。



Fig. 7 Single mode cavity and PZT sample covered with a couple of SiC.



Fig. 8 PZT pellets sintered by microwave radiation of 2.45GHz.

PZT原料には市販のPbTiO<sub>3</sub>-PbZrO<sub>3</sub>-Pb(Ni<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>)O<sub>3</sub> 系の微粉末(平均粒径0.16µm)を用いた。この原料粉 末を¢18mmの金型で一軸成形後,CIP処理したものを 焼結用試料とした。焼結雰囲気は酸素気流中とし,一 部大気中でも行った。マイクロ波焼結の場合は,室温 から一定の速度で急速加熱(約170°C/min)し,焼結時 間は5~20minとした。さらに,従来法と比較するた めに,PbO雰囲気中で昇温速度300°C/h,焼結時間4h の条件で電気炉焼結を行った。各焼結法で得られた焼 結体の密度を測定し,さらに結晶粒径,X線回折及び 格子定数から微構造を調べ,マイクロ波焼結と電気炉 焼結の焼結性の違いについて検討した。

Fig. 9に, PZT試料をマイクロ波焼結したときの, 焼結体密度と試料蒸発量を示す。マイクロ波焼結では, 850°C, 5minの低温・短時間焼結で既に7.9g/cm<sup>3</sup>の密 度が得られ,さらに900°Cでは8.2g/cm<sup>3</sup>以上の高密度 が得られた。一方,電気炉焼結の場合は,いずれの焼 結温度でもマイクロ波焼結より低密度であった。この ようにマイクロ波焼結よりも高密度が得られたのは, マイクロ波加熱が内部加熱であるために材料内部の空 孔が減少することと,急速・短時間焼結により緻密化 速度が増大する<sup>11)</sup>ためであると考えられる。さらに, マイクロ波焼結の場合,1100°C, 5minの焼結でも試料 蒸発量は0.3%程度であり,PbO雰囲気中でないにもか かわらず蒸発はほとんど生じなかった。なお,大気中 でマイクロ波焼結しても,密度,蒸発量は酸素雰囲気 中の場合とほぼ同じ値であった。

マイクロ波焼結体と従来の電気炉焼結体の断面組織 を比較した例を,Fig.10に示す。マイクロ波焼結の場 合,焼結温度1000°Cでは粒径が細かく,平均粒径は 1µm以下であった。これに対して電気炉焼結の場合, 1000°Cでは約1.5µmとなり,1100°Cでマイクロ波焼結 した焼結体粒径と同程度であった。これらのSEM写真 から画像処理して得られた焼結体の平均粒径をFig.11 に示す。マイクロ波焼結の場合は焼結時間が短いため,



Fig. 9 Temperature dependence of density and evaporation loss for PZT ceramics.



(a) Microwave sintering for 5min



(b) Conventional sintering for 4h

Fig. 10 Microstructure of chemically etched surfaces of PZT sintered at 1000°C.

焼結温度を高くしても粒径はあまり大きくならず,微細な組織であった。これに対して電気炉焼結では,粒径は焼結温度に比例して直線的に増大し,マイクロ波焼結体に比べて著しく増大した。これは,電気炉焼結の場合,加熱・冷却を含めた焼結に要する全体の時間が,マイクロ波焼結に比べて極めて長いためであると考えられる。

Fig. 12にマイクロ波焼結体及び電気炉焼結体のX線 回折図形を示す。マイクロ波焼結の場合,900°C, 5minの焼結条件で,原料粉末に見られたパイロクロア 相はなくなり,ペロブスカイト相のみとなった。さら に焼結温度を上げると,1050°Cで(002),(200)及び (103),(301)にピーク・スプリットが現れ,より正方晶性 の強い結晶構造になっていた。これに対し電気炉焼結 の場合,950°C,4hの焼結では原料粉末と同じパイロ クロア相が存在し,焼結がまだ不十分であると思われ た。さらに,1200°Cの高温にしないとピーク・スプリ ットは観察されなかった。これらのことから,マイク ロ波焼結では電気炉焼結よりも焼結性がかなり促進さ れていると推察された。

6.3 焼結体特性

焼結体の特性評価には直径φ13mm,厚さ0.5mmの円 板状の試料を用い,圧電特性,誘電特性,電界誘起変 位<sup>12)</sup>及び曲げ強度を測定した。Fig. 13に径方向の電 気機械結合係数kp,比誘電率ε,と焼結温度の関係を示 す。いずれの焼結方法でも,kpは1000°C付近でほぼ 一定となった。しかしながら,950°Cの低温域ではマ イクロ波焼結の方がkpの低下が小さかった。ε,の場合 はさらに顕著な傾向を示し,いずれの焼結温度でもマ



Fig. 11 Average grain sizes of PZT sintered by microwave and conventional process.



Fig. 12 X-ray diffraction patterns of PZT after (a) microwave sintering for 5min and (b) conventional sintering for 4h.



Fig. 13 Sintering temperature dependence of electromechanical coupling factor Kp and dielectric constant  $\varepsilon_r$ .

31

イクロ波焼結の方が ε, は著しく大きかった。またマイ クロ波焼結の場合,焼結時間を長くすると,これらの 特性値はさらに大きくなる傾向を示した。

次に, PZT焼結体の比誘電率 ε. 及び格子定数から求 めた正方歪 (c/a) の粒径依存性をFig. 14に示す。ただ し格子定数の測定には,プロファイル・フィッティン グ法13)を用い,X線回折の半値幅などから判断して, 正方晶構造と仮定して計算した。いずれの焼結法を用 いても,結晶粒径が大きくなると $\varepsilon_r$ も大きくなるが, 同一粒径で比較するとマイクロ波焼結の方が大きな値 を示した。すなわち,電気炉焼結では粒径が5µm近く まで粗大化しなければ $\varepsilon$ は増大しないが,マイクロ波 焼結では粒径が大きくなるとともに急激にε,も増大し, 1.5µmの微細粒径でも高誘電率化が達成できた。また 同様に,結晶粒径が大きくなるとc/aも増加する傾向を 示したが,マイクロ波焼結の場合,1µm程度の微細粒 径でもc/aは既に大きな値を示していた。結晶粒径が増 大するにつれてc/aも大きくなり, ε,も高くなることが 知られているが,本実験においても同様な傾向が得ら れた。しかしながら,マイクロ波焼結では低温・短時 間焼結でもc/aは十分大きくなり,その結果,微細組織 で誘電率の高い焼結体が得られたものと考えられる。

Fig. 15に焼結体強度の粒径依存性を示す。結晶粒径が小さいほど強度は大きくなる傾向にあるが,いずれ



Fig. 14 Grain size dependence of dielectric constant  $\varepsilon_r$  and crystal tetragonality (c/a).

の粒径においても,マイクロ波焼結の方が電気炉焼結 よりも高強度であった。これは,マイクロ波焼結が低 温・短時間加熱であるために微細組織が得られ,内部 空孔が少なく焼結密度が高いためであると考えられる。

次に,曲げ強度と電界誘起変位の関係をFig. 16に 示す。強度と変位はいずれの焼結条件でも反比例の 関係にあり,高強度を得ようとすると変位は低下す る傾向を示した。しかしながら,電気炉焼結と比較 すると,同変位での強度はマイクロ波焼結の方が約 15%向上していた。さらに,曲げ強度と電気特性との 関係をFig. 17に示す。kp, *ε*,ともに,これらの特性値 が大きくなると強度は低下する傾向を示したが,同じ



Fig. 15 Grain size dependence of bending strength of sintered PZT.



Fig. 16 Relation between bending strength and displacement induced on electric field in PZT pellets.

電気特性値で比較すると,マイクロ波焼結体の方が電 気炉焼結体よりも高強度を示し,いずれの場合も電気 炉焼結に比べて約30%の強度向上が見られた。このよ うに,変位よりも圧電性や誘電性で比較した方がマイ クロ波焼結による強度向上が顕著であった。

以上のように,マイクロ波焼結では,高密度かつ微 細組織であるために高強度が得られ,さらに焼結反応 が促進されるために,微細粒径でも圧電性や誘電性の 優れた焼結体が得られることがわかった。

7. おわりに

本報告では,マイクロ波焼結法とその応用について, 当所での研究例を中心に述べた。マイクロ波焼結は低 温・短時間焼結に特徴があり,高密度で微細な組織が 得られ,PZTのような焼結雰囲気に敏感なセラミック スでも大気中焼結が可能である。このような特徴を利 用すれば,焼結雰囲気にとらわれず,高強度で高機能 なセラミックスを短時間で焼結できる可能性がある。 また,急速加熱や選択加熱を積極的に利用することに より,従来の電気炉焼結では得られない全く新しい特 性を持った材料の創製も期待できる。

マイクロ波によるセラミックスの焼結は,研究が始 まってから日がまだ浅く,実用化していないのが現状 であるが,MRS や Am. Ceram. Soc.の主催で1987年か ら毎年 Microwave Processing Symposium が開催されて



Fig. 17 Relation between bending strength and electric properties of sintered PZT.

いる<sup>14,15)</sup>。この技術を現在の研究レベルから応用開 発レベルへ近づけるためには,大寸法の試料を生産性 の高い方法で,安定かつ均一に焼結するための量産化 技術の開発が必要である。今後この分野が発展し,セ ラミックスの用途がさらに拡大することが望まれる。

#### 謝辞

本実験を遂行するにあたり,試料の作製,評価にお いて当所無機材料研究室に協力をいただいた。

#### 参考文献

- 1) Sutton, W. H. : MRS Bulletin, 11(1993), 12
- 2) マイクロ波加熱技術集成, 越島哲夫編, (1994), 124, NTS
- Metaxas, A. C. and Meredith, R. J. : Industrial of microwave heating, (1983), 54, 70, Peter Peregrinus, London
- 4) 福島英沖,山中暎夫,松居正夫:精密工学会誌,53-5 (1987),743
- 福島英沖、山中暎夫、東博純、松居正夫:精密工学会誌、 54-2(1988), 305
- 6) Fukushima, H., et al. : J. Mat. Res., 5-2(1990), 397
- 福島英沖,渡辺吾朗,松居正夫:精密工学会誌,58-1(1992),75
- Fukushima, H., et al. : Trans. Mat. Res. Soc. Jpn., 14A (1994), 759
- 9) 福島英沖, 森広行, 松居正夫:日本セラミックス協会秋
   季シンポジウム, (1992)
- 福島英沖, 森広行, 畑中達也, 松居正夫:日本セラミックス協会年会講演予稿集, (1994), 435-6
- Harmer, M. P. and Brook, R. J. : J. Brit. Ceram. Soc., 80(1981), 147
- 12) 浅井満,神谷信雄:日本セラミックス協会年会講演予 稿集,(1994),437
- 13) Toraya, H.: J. Appl. Cryst., 19(1986), 440
- Clark, D. E., et al., eds. : Microwaves; Theory and Application in Material Processing, Ceramic Transactions, 21(1991)
- Beatty, R. L., et al., eds. : Microwave Processing of Materials III, MRS Symp. Proc., 269(1992)

# 著者紹介



 福島英沖 Hideoki Fukushima
 生年:1955年。
 所属:表面改質研究室。
 分野:特殊加工,表面改質技術に関する 研究。
 学会等:精密工学会,日本セラミックス 協会会員。
 1989年精密工学会賞受賞。



 森広行 Hiroyuki Mori
 生年:1967年。
 所属:表面改質研究室。
 分野:特殊加工,表面改質技術に関する 研究。
 学会等:日本セラミックス協会会員。



松居正夫 Masao Matsui 生年:1942年。 所属:材料1部。 分野:塑性加工,特殊加工技術の研究・ 開発。 学会等:日本塑性加工学会会員。

1989年精密工学会賞受賞。 工学博士。



渡辺吾朗 Goro Watanabe 生年:1957年。 所属:表面改質研究室。 分野:抵抗溶接・ろう接等に関する研究。 学会等:溶接学会会員。