

酸化物系ファインセラミックスの特性と品質について

水 野 修

1. はじめに

ファインセラミックスはその優れた特性により、広汎な分野に亘って機能及び構造材料の主要な素材として位置づけられている。しかしながら、ファインセラミックスがもっている固有の機能の開発及び部材として用いられた時の信頼性と安定性の評価等は、まだ完全に把握されたと言えないのが現状である。

一言に、ファインセラミックスといっても、その種類、量は膨大なものであり、一元的なアプローチでは不可能であることは周知のことである。(表1)

ここでは、素材の面から酸化物・非酸化物セラミックス材料に分類されたもののうち、酸化物系のある種のセラミックス(後述)を取り上げて、二・三の実験項目とその結果について検討することとする。

酸化物か否かは、大きな差があり、製造法において決定的な違いを示す。

酸化物系セラミックスは、ごく一般的な製造法に準じている。つまり、大気中、大気圧で成形焼結される。炉内雰囲気は単なるダンバ操作・バーナ操作、もしくはわずかなキャリアガスでの雰囲気調整にて製造される。それに対して、炭化物、窒化物、カルコゲン化物等は、真空、不活性ガス雰囲気中で焼結される。これは装置的にも、操作的にも複雑かつ高コストのものとなっている。そこで今回は、我々となじみも深く、使用される量も多い次の酸化物系セラミックスを選んだ。

表1 ファインセラミックスの機能・材料・応用関連表

機能大分類	機能	酸化物セラミックス	非酸化物セラミックス	応用製品例
熱的機能	耐熱性	Al ₂ O ₃	SiC, Si ₃ N ₄	耐熱構造材
	断熱性	ZrO ₂ , SiO ₂	C	各種断熱材
	伝熱性	BeO	SiC(+BeO)	基板
機械的機能	硬質・耐熱性	Al ₂ O ₃	SiC	メカニカル・シール・リング
	切削性	Al ₂ O ₃	TiC, TiN	切削工具
	研磨性	—	B ₄ C, ダイヤモンド	砥石, 研磨材
生物・化学的機能	生体適合性	Al ₂ O ₃ , アパタイト	—	人工骨
	担体性	コーディエライト	—	触媒担体
	耐食性	Al ₂ O ₃	BN, TiB ₂ , Si ₃ N ₄	耐食部材
電気・電子的機能	絶縁性	Al ₂ O ₃	SiC(+BeO)	IC基板, パッケージ
	導電性	ZrO ₂	SiC, MoSi ₂	抵抗発熱体
	誘電性	TiO ₂ , BaTiO ₃	—	コンデンサ
	イオン伝導性	ZrO ₂ , β-Al ₂ O ₃	—	酸素センサ, 電池
半導体	—	SnO ₂ , ZnO-Bi ₂ O ₃	SiC	ガス・センサ, バリスタ
	圧電性	(Zn, Mn)Fe ₂ O ₄	—	—
光学的機能	蛍光性	Y ₂ O ₃	—	蛍光体
	透光性	Al ₂ O ₃	—	Naランプ
	偏光性	PLZT	—	偏光素子
	導光性	SiO ₂	—	光ファイバ
原子力関連機能	原子炉材	UO ₂	UC	核燃料
	減速材	BeO	C	減速材
	制御材	—	B ₄ C	制御材

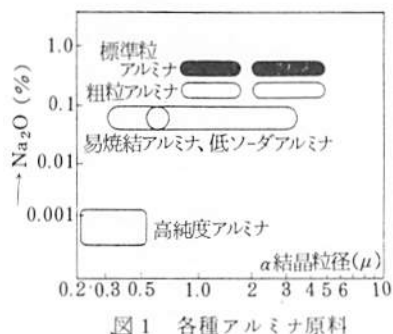


図1 各種アルミナ原料

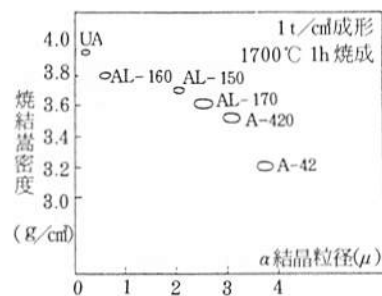


図2 各種アルミナ製品の焼結特性



図3 アルミナセラミックス



図5 ジルコニアセラミックス

(1)アルミナ、(2)ジルコニア、(3)コーディエライト、(4)フォルステライト、(5)チタン酸アルミニウム、について焼成性状、熱的特性、機械的特性、電気的特性について検討を加えた。

2. 基礎性状試験

2.1 試料の紹介

(1) アルミナ (Al₂O₃)

主として、ボーキサイトからバイヤー法によって製造されるもので、金属アルミニウムを製造する際の中間生成物として得られる。製造法の関係から、Na₂O成分の混入が認められ、その含有量と粒度(α結晶粒)によって各グレードに分類されている。(図1)

焼結性の難易もα結晶粒径に大きく依存している。(図2)

本実験では、易焼結性アルミナ(A-16:アルコア社製)と微粒標準アルミナ(A-48:昭和軽金属社製)((注)ボールミルで48H粉碎したもの)を用いた。

アルミナはファインセラミックスの代表的素材で用途も非常に多く(図3)、なおかつ、使用量も他の材質を、はるかに凌いでいる。(図4)

(2) ジルコニア (ZrO₂)

セラミックスの最大のデメリットといわれる“脆さ”を克服しつつある素材のひとつである。

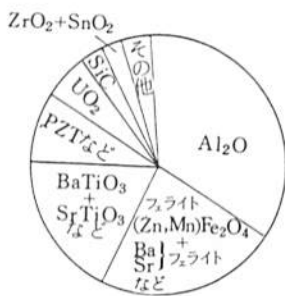


図4 各素材の生産量

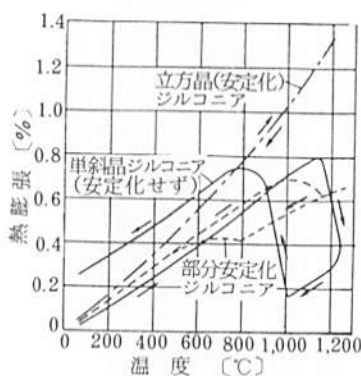


図6 ジルコニアセラミックスの熱膨張曲線

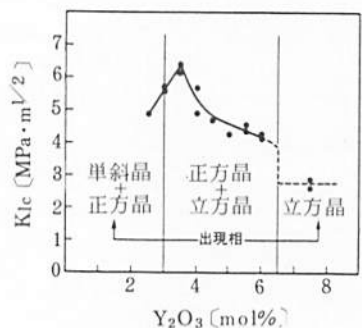


図7 ZrO₂-Y₂O₃系のK1c

また、電気的にも特異な性質（酸素イオン伝導体）を示し、様々な応用の可能性を秘めている。

(図5)

しかしながら、ジルコニアは結晶形が、単斜晶系↔正方晶系↔立方晶系と温度変化によって転移し、熱膨張曲線も図6に示すように、大きなヒステレシスを描く。その際、内部応力を発生し、極端に強度を弱める。その対策として“安定化”剤の添加が効果があり改質が加えられている。

添加元素によって立方晶構造を常温近くまで安定化されたジルコニアを、安定化ジルコニアと呼んでいる。安定化剤としては、CaO、MgO、Y₂O₃が使用されている。

安定化ジルコニアは、酸素センサ、燃料電池用部材として利用されている。

この安定化ジルコニアの安定化剤の含有量を減少させて、なお、中間温度域の安定相である正方晶を立方晶中に極めて微細（臨界結晶粒径は0.1～0.2μmといわれる）に析出させる。正方晶の存在が靱性を発現させる。高靱性の発現メカニズムは他書を参考していただくが、この正方晶を析出させた高靱性ジルコニアは部分安定化ジルコニア（PSZ）と呼ばれている。

靱性を評価する方法には、破壊靱性値（K_{Ic}）で表わすことが多く用いられているが、これに従って、部分安定化ジルコニアのK_{Ic}との関係は図7で示されたようになる。

安定化ジルコニア、部分安定化ジルコニアとも今後、多くの分野で利用されると思われる。

(3) コーディエライト（2MgO・2Al₂O₃・5SiO₂）

自動車用排ガス浄化システムに組み込まれたハニカムセラミックス（蜂巢状セラミックス）がセンセーショナルに開発されてから、かなりの時間を経過したが、これに用いられる有力な素材のひとつにコーディエライトセラミックスがある。

コーディエライト結晶は、粘土とタルクとアルミナ成分を仮焼することによって容易に合成されるが、焼成（焼結）温度巾が非常に狭く、均一緻密焼成体を得ることが困難とされている。このため、焼結性改良のために、多くの研究報告があり、それらによると、La₂O₃、CeO₂、Y₂O₃等希土類元素酸化物、ZnO、TiO₂、Ta₂O₃、V₂O₅等の金属酸化物の添加による製造法が良好な結果を得たという報告がなされている。

表2 ファインセラミックスの成形法とその適用製品

成形法	適用製品
① 流込み法	複雑形状品，大形品
② 押し出し法	円柱，円筒状の長い製品の量産
③ プレス法	平板状品の量産
④ ラバープレス法	均質製品，単純形状では量産可能
⑤ テープ法	薄板状品の量産
⑥ 射出成形法	複雑形状品の量産
⑦ ホットプレス法	高密度，高強度を必要とする製品
⑧ HIP法	⑦と同じ，特に難焼結品

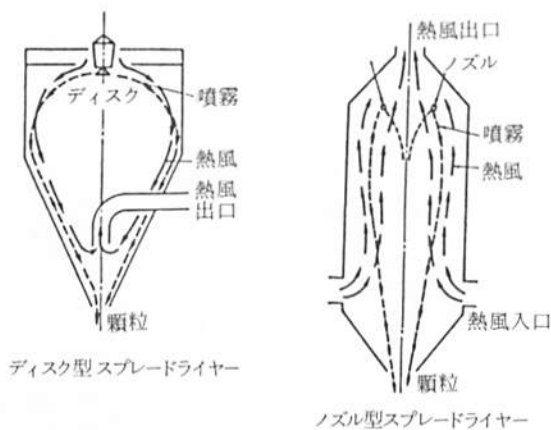


図8 スプレードライヤー（噴霧乾燥機）

コーディエライトセラミックスの最大の特徴は、熱膨張が非常に小さく、なおかつ、機械的強度もかなり高い部類に属する素材である。

また、長石を混合して、セルフグレージング現象を利用したものも製造されている。

(4) フォルステライト ($2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$)

$\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ の二成分系において生成する化合物で、代表的なものに、ステアタイト(結晶形はエンスタタイト： $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$)、フォルステライト等がある。

出発原料はタルクとマグネシア、もしくは、マグネサイトから合成されている。

用途はステアタイト磁器と、ほぼ同様であるが、ステアタイトよりも電気的性質や機械的強度の経時劣化を改良した材質で、電気的性質、なかでも通信用ではマイクロ波を中心に高周波に対する、誘電体損 ($\tan \delta$)が極めて小さい値を示す。しかも焼成温度は比較的広く、くり返しの加熱に対しても安定であるように改良されたものである。

(5) チタン酸アルミニウム ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{TiO}_2$)

熱膨張率が 0.0 %ないしは負の値を示す数少ない素材のひとつである。しかしながら、低い熱膨張率の原因は、結晶の粒内や粒界に発生したマイクロクラック(微細な亀裂)で、これらの加熱時での挙動が熱膨張に影響を与える。したがって見掛け上、非常に小さい値の熱膨張係数を示すのである。このマイクロクラックの存在は、セラミックスとして低膨張性を示す原因であるが、機械的強度、焼結性には良い結果を示さない。

チタン酸アルミニウムの最大の特徴である低膨張を示し、かつ機械的強度、焼結性、高温安定性等を改良するために多くの研究・報告がある。それらによると、次のものを添加することが有効であるといわれている。 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 ZrO_2 、 SnO_2 等が挙げられている。

2.2 粉粒体の調製

セラミックスの成形体を得る方法として、表2に示された方法がある。

ここでは、いわゆるプレス成形、一軸加圧成形によるものであるが、単に調合された坯土を型に充てんし、上方又は下方から加圧されるだけでは、ラミネーションが発生し、均一の成形体は得られない。そこで流動性の良い粉粒体の調製が必要となってくる。

スプレードライヤーと称する装置によって調製される。これには大きく二種類のタイプに分けられる。ディスク型と加圧ノズル型等、噴霧化の方法によって分けられている。(図8)

本報告に使用された試料は主としてディスク型で調製されたものである。ノズル型で調製され

表3 原料の化学組成

(単位 %)

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	ZrO_2	Y_2O_3	Ig-Loss	Total
コーディエライト	47.18	31.70	0.50	0.15	0.72	8.04	0.53	0.31	—	—	8.65	97.78
フォルステライト	37.45	4.54	0.09	0.03	0.59	47.27	0.67	0.17	—	—	5.93	96.74
ジルコニア	0.01	0.07	0.01	—	—	—	0.01	—	91.53	5.19	3.17	99.99
アルミナ(A-16)	0.89	94.13	0.02	0.01	0.16	0.11	0.19	0.20	—	—	4.18	99.89
アルミナ(A-43)	0.85	93.44	0.03	0.02	0.20	0.04	0.13	0.18	—	—	3.30	98.19
チタン酸アルミニウム	12.32	51.07	1.12	27.23	0.28	0.24	0.36	0.39	—	—	4.50	97.51

たものは、粉粒体（顆粒）の粒径が大きく、大型品の成形に適するといわれている。

粉粒体の調製上の留意点も数多く挙げられているが、その主なものは、懸濁液（泥しょう）濃度、粘性調整用のバインダの種類と添加量、ディスク盤の回転数、乾燥温度、装置の塔高・塔径等々がその因子として重要である。

3. 特性評価試験

3.1 原料の化学組成

蛍光X線分析法（溶融法）によって使用した試料の化学組成を検討した。表記は重量%で、I_g-loss 値は造粒操作の際のバインダー量である。結果を表 3 に示す。

3.2 プレス成形及び試料の焼成

日本工業規格 JIS C2141（電気絶縁用セラミックスの材料試験方法）に準じて試験片を作成した。

金型プレスにて適当量充てんし、1 t/cm²の圧力で成形した。

焼成は、温度コントローラー付の電気炉（発熱体は二珪化モリブデン製）にて、図 9 に示す焼成スケジュールで行った。

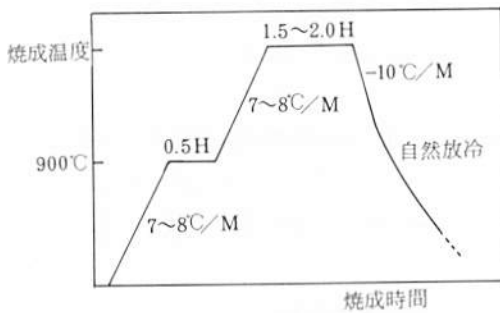


図9 各種セラミックスの焼成スケジュール

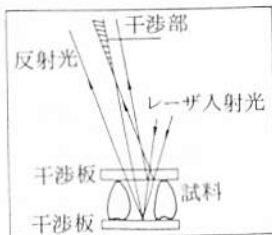


図11 レーザ干渉式熱膨張計原理図



写真1 干渉縞

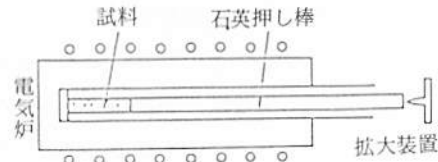
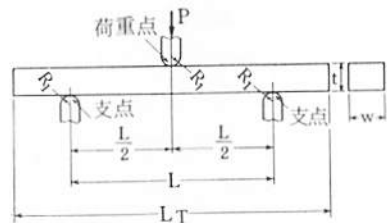
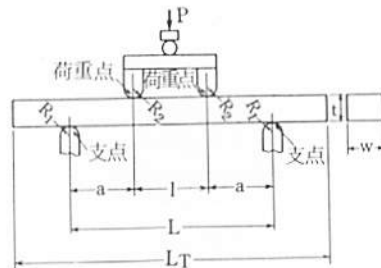


図10 押棒式示差熱膨張計原理図



(a) 3点曲げ



$R_1: 2.0 \sim 3.0 \text{ mm}$ $L: 30 \pm 0.5$

$R_2: 0.5 \sim 3.0 \text{ mm}$ $l: 10 \pm 0.5$

$a: 10 \pm 0.5$

(b) 4点曲げ

図12 曲げ強さの試験方法 (JIS R 1601)

表 4 焼成性状と熱膨張

	焼成温度 (°C) × 1H	焼 成 性 状				平均熱膨張係数	
		吸水率 (%)	かさ比重	見掛比重	見掛気孔率 (%)	押棒式	光干渉式
						~900°C × 10 ⁻⁶	~900°C × 10 ⁻⁶
アルミナ A - 16	1450	3.54	3.45	3.93	12.23	8.12	8.02
	1550	0.47	3.76	3.83	1.77	8.38	7.98
	1650	0.07	3.88	3.89	0.29	8.21	8.10
アルミナ A - 43	1450	8.34	2.95	3.92	24.63	8.36	7.67
	1550	2.93	3.47	3.86	10.15	8.34	7.61
	1650	0.10	3.78	3.79	0.37	8.40	7.86
コーディエライト	1300	19.88	1.73	2.64	34.41	2.37	2.37
	1350	11.87	1.97	2.57	23.35	2.44	2.00
	1400	1.99	2.38	2.50	4.77	2.51	2.22
	1420	0.05	2.42	2.42	0.12	—	—
ジルコニア	1200	7.89	4.09	6.03	3.22	10.80	—
	1350	0.09	5.99	6.02	0.55	11.30	—
	1450	0.01	6.08	6.09	0.09	11.30	11.00
	1550	0.00	6.05	6.05	0.00	11.40	—
フォルステライト	1300	3.85	2.70	3.01	10.39	11.11	—
	1350	0.01	3.08	3.09	0.03	11.98	11.29
	1380	0.01	3.07	3.07	0.04	11.80	—
チタン酸アルミニウム	1400	7.76	2.95	3.38	20.05	—	—
	1500	2.33	3.20	3.41	5.88	—	—
	1600	1.19	3.23	3.36	3.20	1.90	1.15

3.3 熱的特性試験

3.3.1 焼成性状試験

焼結度の目安になる見掛比重、かさ比重、見掛気孔率、吸水率をアルキメデス法により、それぞれ測定、算出した。(表 4 参照)

3.3.2 熱膨張の測定

押棒式熱膨張計(成瀬科学器械製)と非接触光干渉式熱膨張計(東芝硝子製)により、熱膨張を測定した。

押棒式示差熱膨張計の原理図を図10に示す。

光干渉式熱膨張の測定原理を図11に示す。

光干渉による変位測定について説明を加えることにする。

測定試料をはさんで、平行に置かれた2枚の干渉板(この場合はサファイア製)に、レーザー光(He-Ne レーザ、 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$)を入射させ、干渉板によって反射された光を重ねると、光の干渉現象がおこる。干渉面間の距離が等しい点を連ねると、暗部と明部に分れた縞模様を描かれる(写真1)、変位があれば、この干渉縞も移動し、正確な変位量を記録することができる。

光の波長を基準としているため、較正の必要もなく、経年変化もない等の利点が認められる。

3.3.3 熱伝導率測定

アルミナ A - 16 と A - 43 の常温 ~ 800°C における熱伝導率をレーザー・フラッシュ法(理学電

機製熱定数測定装置)により測定した。円板状試料表面にルビーレーザーのパルス閃光を瞬間照射し、表面で吸収された熱量が内部を貫流して裏面に伝導し、熱平衡に達するまでの裏面の温度変化を測定し、その温度変化から熱伝導率を求めるものである。

又、熱線法(JIS R2618 準拠、京都電子工業製TC-31型)により、ジルコニア、フォスフェイト、コーディエライト、チタン酸アルミニウム)の室温における熱伝導率を測定した。

3.3.4 熱衝撃試験

試料を所定の温度の電気炉の中に30分間保持した後、すばやく、水中に投入して急冷し、3点ないし、4点曲げ強さを測定し、耐熱衝撃性の評価を行った。(図12)

3.4 機械的特性試験

熱的特性と不可分の関係にある高温曲げ強さを測定した。

電気炉を所定の温度(室温~最大1250℃)に15分間保持した後、SiC(炭化珪素)製抗折試験用治具を備えた装置(東京試験機製高温抗折試験機SC-SCS)により、クロスヘッド0.5mm/min、スパン30mmの3点曲げ試験により測定した。

3.5 電気的特性試験

電気的特性はファインセラミックス、なかでも機能性セラミックスといわれるものでは非常に重要で、測定項目についても測定方法についても、多種多様にわたっている。

ここでは、体積固有抵抗値の加熱にともなう温度依存性を求めた。

図13に示すような装置を用い、3℃/minの割合で、炉内温度を上昇させながら、適当な温度間

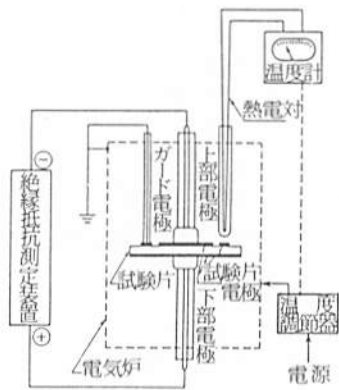


図13 高温電気抵抗測定装置

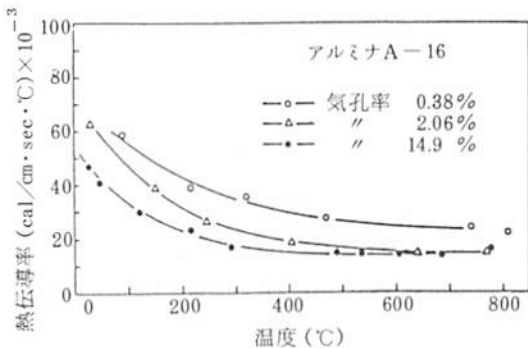


図14 アルミナA-16の熱伝導率

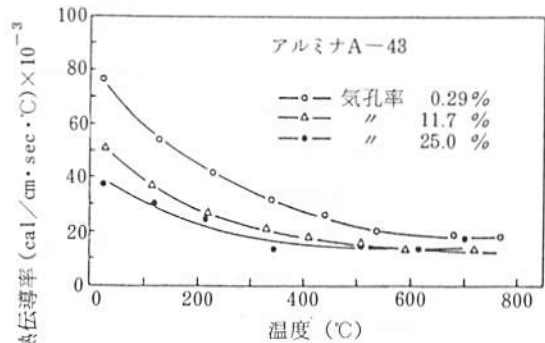


図15 アルミナA-43の熱伝導率

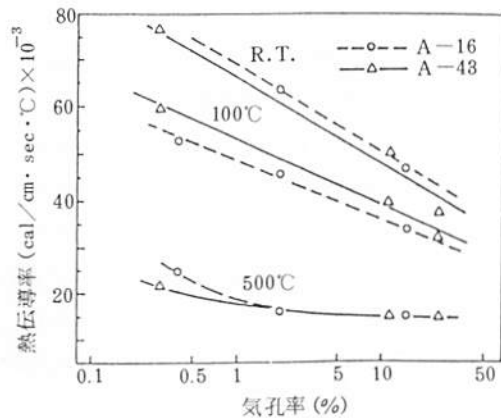


図16 アルミナと熱伝導率と気孔率との関係

隔で、電気抵抗値を記録する。形状因子（電極面積／厚さ）を乗じて、体積固有抵抗値を算出する。印加電圧は直流10～500Vを加え1分間経過後の指示を読むこととした。

4. 結果及び考察

4.1 焼成性状試験

各試料の焼成温度と焼成性状の結果を表4に示す。

アルミナ(A-16)は易焼結性アルミナで、1450～1550℃で焼結が急速に進み、アルミナ(A-43)に比べて50～100℃程度、低温で焼結が可能であることを示している。

コーディエライトは、1350～1400℃の間で焼結が急速に進み、コーディエライトは焼成巾が狭いことを表わしている。製造技術上注意を要する点である。

ジルコニアは靱性発現のため、できるだけ一次粒子は細かく調整されていることから焼結も比較的、低温で進み、1300℃付近から焼結できる。

フォルステライトは、1300℃付近で焼結し、1380℃程度までゆっくり焼結が進行する。

チタン酸アルミニウムは、1600℃焼成で吸水率は約1%となるが、更に焼成時間を長くしても吸水率は1%以下とはならなかった。

表面にチタン酸アルミニウム特有のマイクロクラックの分布によるものと考えられる。

4.2 熱伝導率の結果について

アルミナA-16、A-43について、熱伝導率の温度と気孔率の影響を調べた。その結果を図14・15に示す。気孔率が小さく、緻密質なものほど熱伝導率が大きくなっている。(図16)

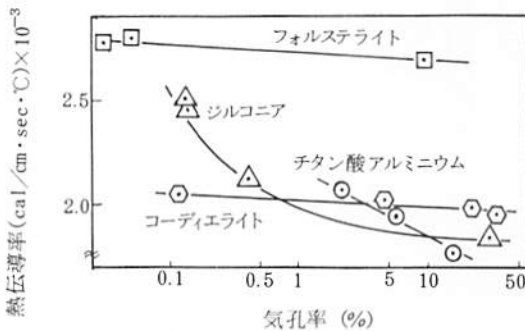


図17 気孔率と熱伝導率の関係

表5 チタン酸アルミニウムの繰り返し測定(～1200℃)による熱膨張係数(×10⁻⁶)への影響

回数	～700℃	～1000℃	～1100℃	～1200℃
1	0.36	1.45	1.69	1.79
5	0.44	1.54	1.64	1.87
8	0.53	1.60	1.69	1.86
10	0.74	1.70	1.83	2.17
12	0.74	1.90	1.86	2.14

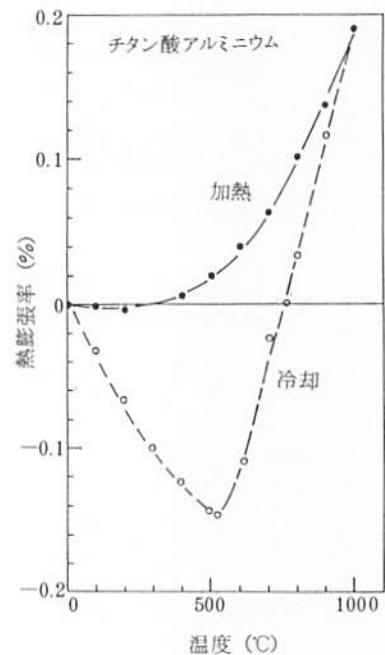


図18 チタン酸アルミニウムの熱膨張曲線

温度依存性は高温になる程、熱伝導率は小さくなる。しかも、緻密質試料の方がその傾向は大きい。

気孔率と熱伝導率の関係は定性的に次の関係がある。

$$K_s = K_m / (1 - P_v)$$

K_s : 固体固有の熱伝導率

K_m : 熱伝導率の実測値

P_v : 気孔率

実際には、 P_v の影響はもっと高い(図17)と仮定した方が実際とよく一致する。これは気孔の形状と分散によると思われる。つまり、気孔の比表面積をパラメータとすることができれば、より理論的であるが、現在のところでは検討を要する段階であろう。

4.3 熱膨張について

従来より、セラミックスを高膨張系、低膨張系他、という分類法があるが、フォステライト、ジルコニアは高膨張系、コーディエライト、チタン酸アルミニウムは低膨張系、アルミナは中膨張系と分類される。

測定法による差違、押棒式膨張計と非接触の光干渉式による差はほとんど認められない。(表4、熱膨張の項参照)、しかしながら、チタン酸アルミニウムについては差が認められる。これはマイクロクラックに起因する。加熱・冷却の際の膨張、収縮のヒステレシス(図18)、及びく

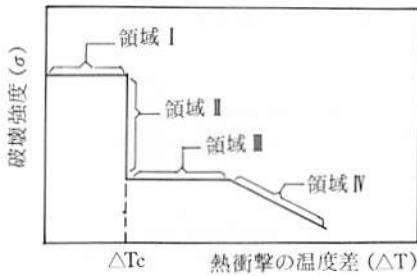


図19 破壊強度と熱衝撃の温度差との関係

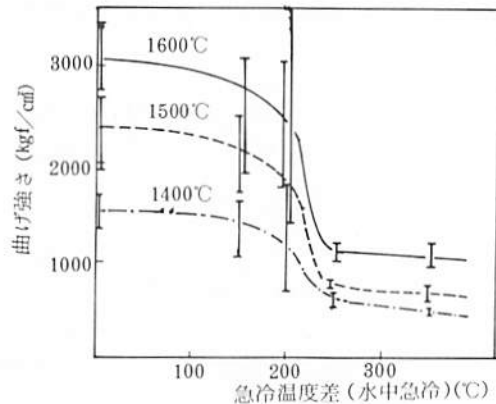


図20 アルミナ(A-16)の耐熱衝撃性

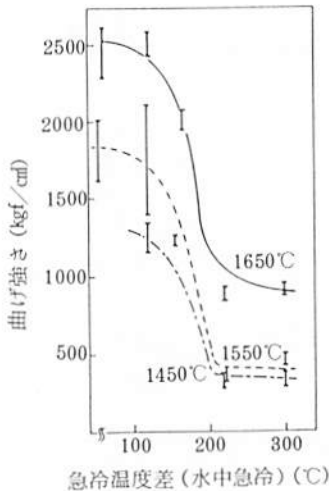


図21 アルミナ(A-43)の耐熱衝撃性

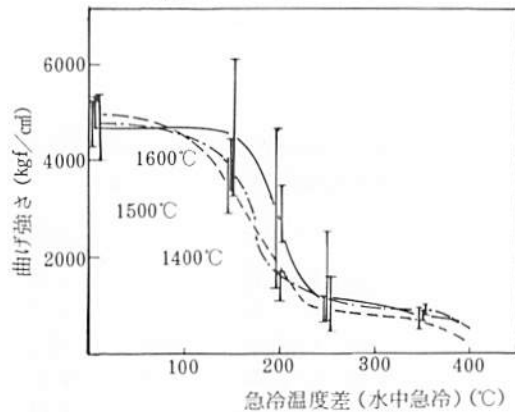


図22 ジルコニアの耐熱衝撃性

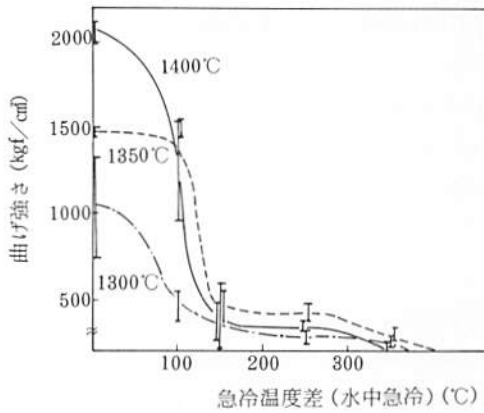


図23 フォルステライトの耐熱衝撃性

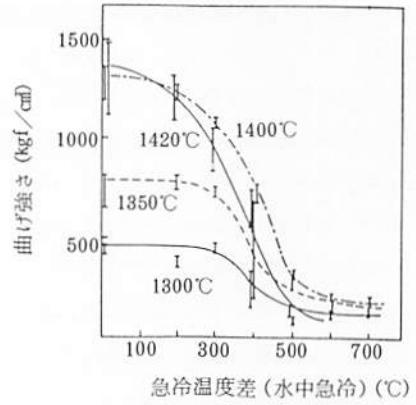


図24 コーディエライトの耐熱衝撃性

り返し加熱による熱膨張係数の変化(表5)等の差のためと思われる。

4.4 耐熱衝撃性について

耐熱衝撃性を評価することは、一般的に困難とされている。にもかかわらず、実用上での関心は高く、種々の方法が報告されている。

ここではHasselmannらによる急冷温度差と強度の関係を検討した。

これらの関係の典型的なパターンは図19に示されたものである。

図中の領域Ⅱに示す温度差(ΔT_c)とどの程度の強度低下が認められたかが重要で、それらにつ

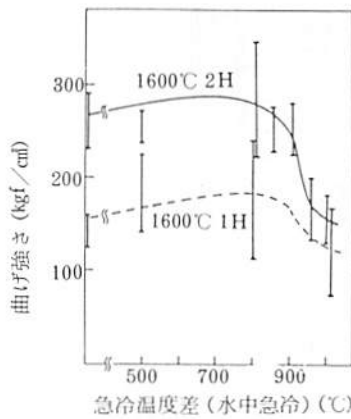


図25 チタン酸アルミニウムの耐熱衝撃性

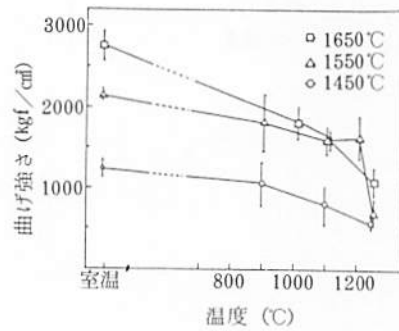


図26 アルミナ(A-43)の高温強度

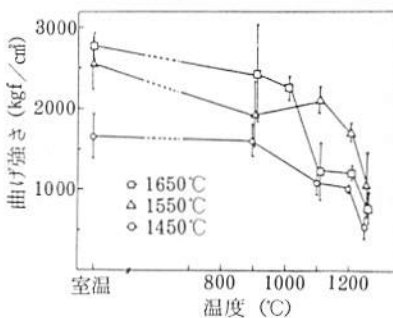


図27 アルミナ(A-16)の高温強度

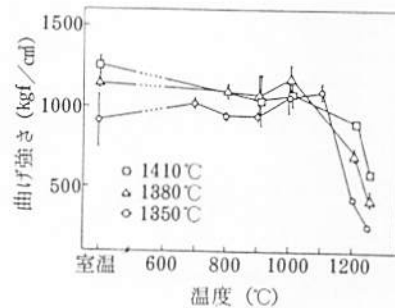


図28 コーディエライトの高温強度

いて検討した。焼結度の高い試料（焼成温度が高く、気孔率の低い）に急激な強度の低下が顕著であった。（図20、21、22、23、24、25） ΔT_c については主に、曲線上の変曲点付近に認められる。その温度での熱膨張率を算出すると、ジルコニアを除いて、ほぼ0.1%の値を示す。つまり、約0.1%の熱歪みで急激な強度低下がおこると考えられる。例外として、ジルコニアは、熱衝撃によるクラックに対しても、正方晶による抵抗性が認められ、同程度の熱膨張率を有したフォスフェイトよりも、高い ΔT_c を示す。

4.5 高温強度について

実験装置、及び実験技術上の問題から、データの蓄積が非常に少ない状態である。

結果は、次のように大別される。一つは、室温強度値がある温度まで保持され、その後、急激

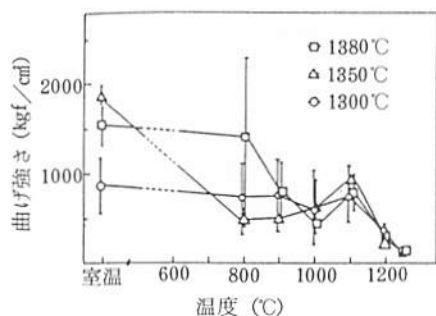


図29 フォスフェイトの高温強度

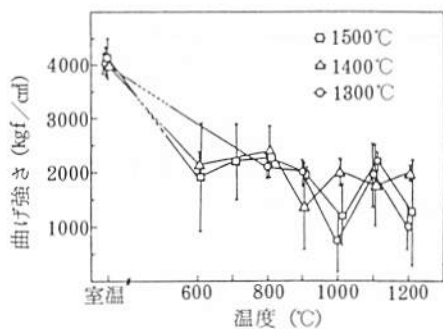


図30 ジルコニアの高温強度

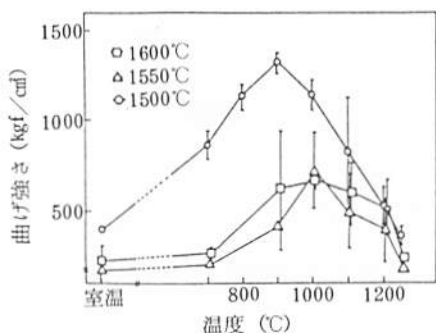


図31 チタン酸アルミニウムの高温強度

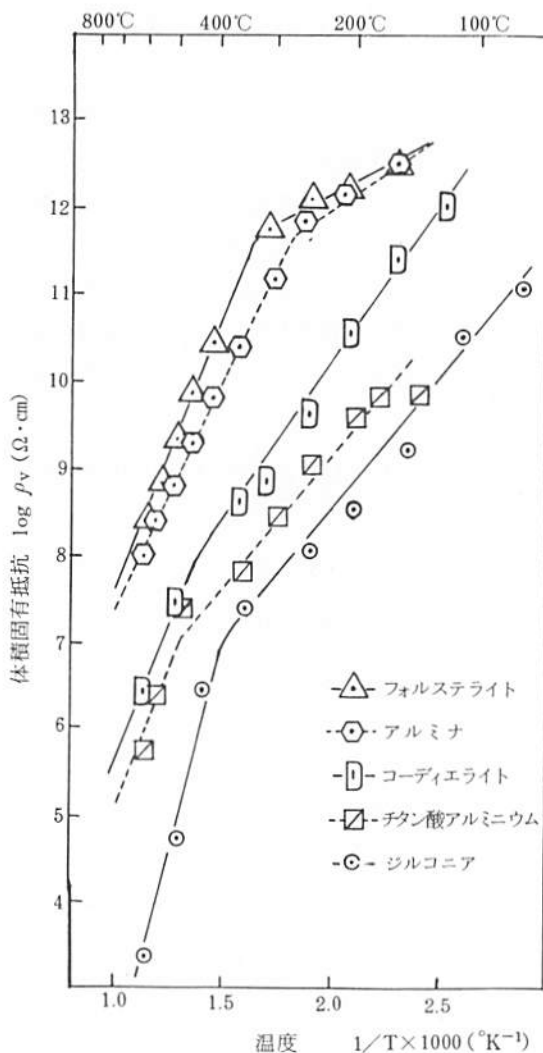


図32 電気抵抗の温度依存性

に強度低下が認められるもの(図26、27、28、29)。

次に室温では、かなりの強度を有するが、温度上昇とともに、徐々に強度低下がおこるもの(図30)。

また、非常に特異なケースと思われるが、加熱中に強度の増加が認められるもの、(図31)等である。

サンプル数、セラミックスの他の種類等、まだ、データは不足気味であるが、高温部材を設計する際、重要な因子であるから、今後ますますデータの蓄積、理論の追求が必要と思われる。

4.6 電気的性質(主として抵抗率の温度依存性)

酸化物系セラミックスは、一部の特殊なものを除いて(例: PTCセラミックス)、温度の上昇とともに、抵抗率は減少する。

温度(絶対温度)の逆数と抵抗率(対数値)をプロットすると、ほぼ直線関係となる。(図32)。いわゆる、Arrhenius の関係を満たしている。

$$\rho_v = \rho_0 \exp(-E/kT)$$

ρ_v : 体積固有抵抗

ρ_0 : 常数

E: 電気伝導における活性化エネルギー

k: ボルツマン定数

T: 絶対温度

時に加熱途中で屈曲点(knick)を有する場合も認められる。

高温絶縁抵抗の目安として、Te値(体積固有抵抗値が、 $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ となる温度)が議論されることが多い。本実験試料のTe値を表6に示す。

5. まとめ

代表的な酸化物系ファインセラミックスについて基本的な特性、焼成性状、熱特性、機械的特性、電気特性等を評価し検討した。これらの特性は材料設計の際には、必ず考慮しなければならない物性である。また、物質構造との関連においても、関係深い測定量である。

ファインセラミックスが新素材の重要な柱として登場して以来、かなりの時間を経過したが、その可能性と限界についての結論は、まだまだ先の問題であると思われる。地道に実験・試験・検討を重ねていかなければならないであろう。

謝辞

本報告は、愛知県瀬戸窯業技術センターにおいて1985年以降行ったファインセラミックス関係の研究テーマの一部をまとめたものである。それらの中で行った実験成果や、当時研究生・研修生が履修した結果が主である。有益な助言を賜ったり、実験の手伝いをして頂いた、深谷英世、名和正博、伊藤政己、田中愛造の各氏に深謝いたします。また、研究・研修のため入所していた加藤 聡氏、国際協力事業団海外研修生Mr. Sutin、Ms. Kantrat(タイ)の各氏に感謝いたします。

表6 各種セラミックスのTe値

セラミックスの種類	Te値
ジルコニア(PSZ)	420℃
チタン酸アルミニウム	590℃
コーディエライト	810℃
フォルステライト	1080℃
アルミナ	1160℃

参考文献

W. D. Kingery : Introduction to Ceramics (1960) John Wiley & Sons.

D. P. H. Hasselman : J. Am. Ceram. Soc., **52**, 600 (1969)

深谷・水野 他 : 愛知県瀬戸窯業技術センター報告 No15 (1986)

名和・水野 他 : 同 上 No14 (1985)

水野 : 昭和61年度 窯業協会東海支部学術研究発表会 講演要旨集 p13-14

水野・稲垣 : 昭和52年 愛知県瀬戸窯業技術センター研究報告書 No 6

水野・稲垣 : 昭和49年 同 上 No 4

坂野久夫 : ニューセラミックス (1984) パワー社

奥田・平井・上垣外 : 構造材料セラミックス (1987) オーム社

日本規格協会 : JIS C 2141

同 上 JIS R 1601