

繊維強化セラミックスの建築分野への適用に関する研究

兼松研究室 7107652 矢野 冬馬

とくとくと水が流れて、すいすいと鯉が泳いで、ぱちぱちと明かりが燃えて、からからとさざめきが響いて、りんりんと空気は清浄で、ゆらゆらと反射が虹をえがいて、まるまると端部はまるやかで、ほくほくと肌合いがよくて、わびさびと劣化は美しくて、やきものが建物になればさぞ気持ちのいい空間になることだろうと思った。

1. はじめに

1.1 研究背景

しかし一般に陶磁器質は寸法安定性に乏しく、また決定的な弱点としての脆さがあり、構造材料として用いるには信頼性に欠ける。一方、化学工学分野においては高精度・高性能セラミックスの開発が行われている。そこではセラミックスの寸法安定性や脆さを克服することを目的とした試みも行われており、建築分野に引用する意義のある知見が多く蓄積されている。

1.2 研究目的

本研究はセラミックス製の建築物を実現することを最終目標とする。本稿はその基礎的試行であり、他分野において試みられているセラミックスの繊維強化手法に着目し、建築分野で用いられている粗く多孔質な基材への適用可能性を検討することを目的とする。

1.3 研究方法

炭素繊維及びアルミナ繊維を混入した陶磁器質タイルを作成し、各工程における試料の寸法及び重量の変化を把握した。またタイルの曲げ強度試験を行い、繊維混入による破壊挙動の変化を把握した。加えて繊維強化セラミックスが建築物の構造材料として用いられることを仮定した建築物を構想した。

2. 繊維強化セラミックスの基本物性の測定

繊維強化セラミックスはセラミックスを高剛化させるための一手法であり、窯炉の構造材料やタービンプレード、スペースシャトルなどに用いられている。

2.1 試験体概要

試験体の原料の概要を表 2.1 及び 2.2 に示す。粘土は扱いやすさの点から信楽粘土を用いた。強化繊維には耐熱性のある炭素繊維及びアルミナ繊維を用いた。また湿式製法に

表 2.1 粘土の概要

化学組成	
SiO ₂	64.36[%]
Al ₂ O ₃	20.52[%]
Na ₂ O	1.52[%]
K ₂ O	2.88[%]
Fe ₂ O ₃	1.12[%]
CaO	1.02[%]
MgO	0.06[%]
かさ密度	絶乾 1.84[g/cm ³] 湿潤 2.01[g/cm ³]
焼成温度	1200~1280[°C]

表 2.2 強化繊維の概要

	炭素繊維	アルミナ繊維
最高使用温度	—*	1600°C
化学組成	C 99.9%	Al ₂ O ₃ 72% SiO ₂ 28%
密度	2.1[g/cm ³]	3.1[g/cm ³]
繊維径	11[μm]	5[μm]
繊維長	3~6[cm]	5~10[cm]
単繊維引張強度	2600[MPa]	1000[MPa]
単繊維引張弾性率	640[GPa]	100[GPa]

*酸化雰囲気においては 300°C 程度で酸化するが、酸化作用を受けなければ 3000°C 以上に耐えられる

表 2.3 試験体水準

記号	繊維種類	繊維混入率[vol%]	製法	記号	繊維種類	繊維混入率[vol%]	製法
N	無混入	0%	湿式	A1	アルミナ繊維	1%	湿式
N'	無混入	0%	乾式	A1.5	アルミナ繊維	1.5%	湿式
C1	炭素繊維	1%	湿式	A2	アルミナ繊維	2%	湿式
C1.5	炭素繊維	1.5%	湿式	A3	アルミナ繊維	3%	乾式
C2	炭素繊維	2%	湿式	CA1.5	炭素繊維 アルミナ繊維	0.75% 0.75%	湿式
C3	炭素繊維	3%	乾式				

よる試験体には反りが生じるため、乾式製法による試験体も製作した。試験体の水準は表 2.3 に示す 11 水準とした。試験体寸法は、湿式によるものに関しては 75*75*9 mm の型枠を用い、乾燥及び形状の調整、焼成を経て最終的に 70*70*7 mm 程度の試験体を得た。乾式によるものは 120*120*9 mm の圧縮体から最終的に 75*75*8 mm 程度の試験体を得た。また試験体は水準ごとに 6 体ずつ製作した。釉薬は機械強度の増進に寄与するが、均一に塗布することが困難であるため、本稿の試験体は無釉とした。また焼成条件は最高 1155°C の酸化雰囲気であり、22 時間かけて加熱し、10 時間かけて徐冷した。

2.2 測定概要

測定項目を表 2.4 に示す。これらの値から焼成前後の重量変化率及び体積変化率、曲げ応力歪み曲線、曲げ荷重変位曲線、曲げ弾性率を導出し、寸法安定性及び機械的性質の評価を行った。また曲げ試験は JIS A 1509-4 による 3 点載荷試験に従い、測定機には INSTRON 社の 33R を使用した。測定方法の概要を図 2.2 に示す。

表 2.4 測定項目

実測値	算出値
寸法[mm]	体積[mm ³]
重量[g]	かさ密度[g/cm ³]
載荷[N]	最大曲げ荷重[N]
最大曲げ荷重[N]	曲げ強度[N/mm ²]
曲げ歪み	最大曲げ強度[N/mm ²]
最大曲げ歪み	曲げ弾性率[N/mm ²]
載荷方向変位[mm]	最大変位[mm]

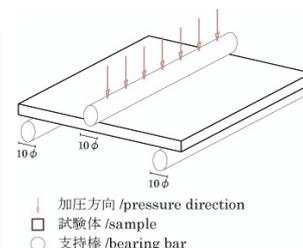


図 2.2 測定方法概要

2.3 結果

2.3.1 重量及び体積の変化

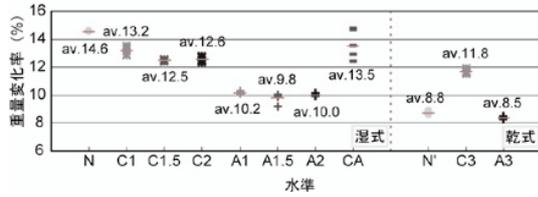


図 2.3 焼成前後における重量変化率

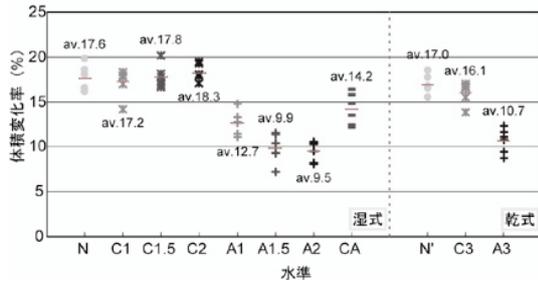


図 2.4 焼成前後における体積変化率

焼成前後の重量及び体積の変化率を図 2.3 及び図 2.4 に示す。湿式製法による水準に関しては、重量の変化率には混入繊維の種類による違いが見られた。また繊維混入率と重量変化の間には一意的な相関が見られなかった。体積の変化率は、炭素繊維を混入した水準が最も大きく、次いで水準 N、水準 CA、水準 A となった。繊維混入率と体積変化の間には相関が見られ、炭素繊維に関しては混入率が高い

ほど体積変化が大きく、アルミナ繊維は混入率が高いほど体積変化が小さかった。また乾式製法による水準に関しては、重量変化率、体積変化率共に湿式試験体とは異なる傾向を示した。

2.3.2 曲げ強度試験

①応力-歪み曲線

各水準の曲げ応力-歪み曲線を図 2.5 に示す。なお水準 A1.5 及び A2 に関しては試験体の反りが大きく、適切な試験を実施できなかったため本稿では省略することとした。また他のアルミナ繊維を含む A1, CA1.5 の 2 水準に関して、反りのために歪み測定点付近で破壊することができなかった。図中より、繊維無混入の水準 N 及び N' は線形を示しているのに対し、水準 C1 や C2, C3, A3 では非線形を示している試験体が散見される。特に水準 A3 では降伏する試験体も見られる。しかし繊維を混入した水準は全体的に曲げ破壊強度が減少しており、その値のばらつきも大きくなっている。

②荷重-変位曲線及び曲げ弾性率

良好な試験体が得られた乾式製法の 3 水準の曲げ荷重-変位曲線と、曲げ弾性率の平均値を図 2.6 に示す。繊維の混入により 3/4 程度の弾性率の低下が見られ、繊維の混入が陶磁器質の靱性向上に寄与することが確認された。

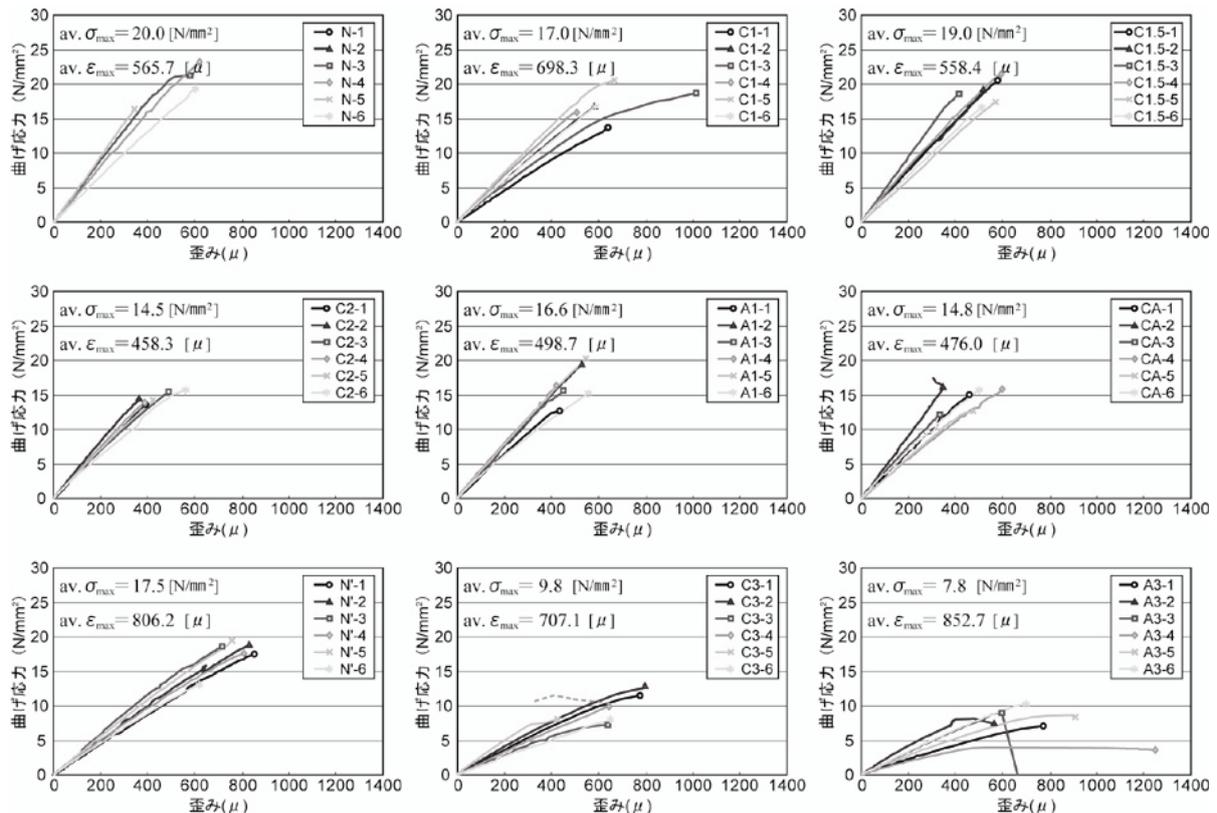


図 2.5 各水準の曲げ応力-歪み曲線

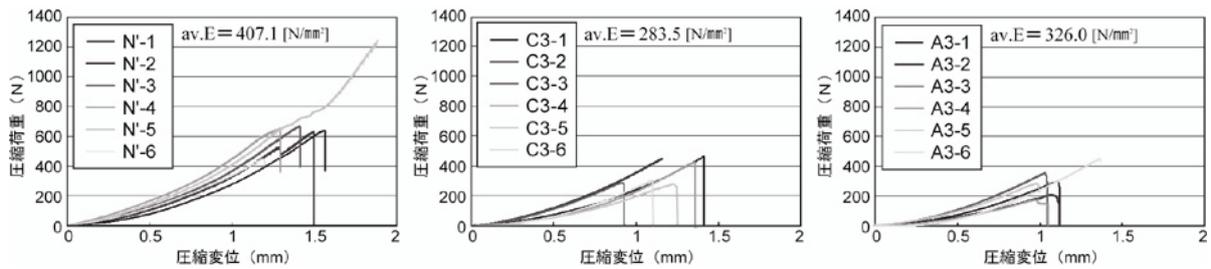


図 2.6 水準 N', C3, A3 の荷重-変位曲線と曲げ弾性率

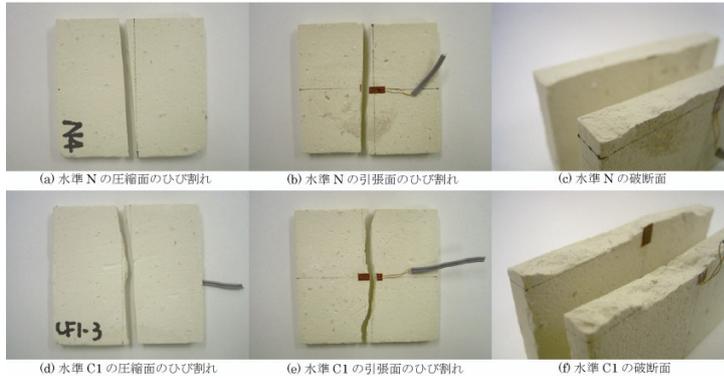


写真 2.1 破断面の様子

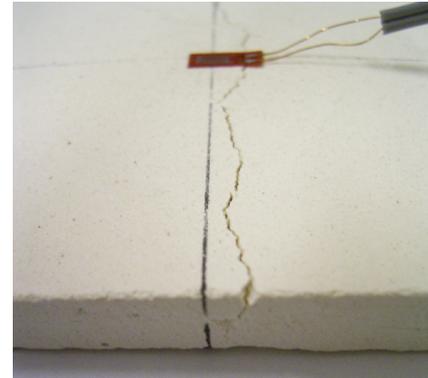


写真 2.2 ひび割れ部の様子

③破壊性状

写真 2.1 に繊維混入の有無による破断面の違いを示す。上段の水準 N の試験体の破断面は滑らかであるのに対し、下段の水準 C の試験体は凹凸のある破断面となっている。また C3-3 及び C3-6, A3-6 は最大荷重後も 2 つに割れなかった。ひび割れ部の様子を写真 2.2 に示す。

2.4 考察

①焼成前後の体積及び重量の変化に関して

焼成前後の平均かさ密度とその変化率を算出したものを表 2.5 に示す。焼成において重量及び体積の変化に作用する要因は、粘土中の水分及び残留有機物が気化する

	焼成前のかさ密度 [g/cm ²]	焼成後のかさ密度 [g/cm ²]	かさ密度の変化率 [%]
N	1.93	2.00	103.7
C1	1.81	1.90	104.9
C1.5	1.83	1.95	106.5
C2	1.77	1.89	107.0
A1	1.81	1.86	102.9
A1.5	1.81	1.82	100.1
A2	1.81	1.80	99.5
CA1.5	1.85	1.87	100.7

点、炭素繊維は 300°C 程度で酸化してしまう点の 2 点であるが、前節の図 2.3 及び図 2.4 と表 2.5 より、以下の 2 点の要因が潜在していることが示唆された。

- ・酸化せずに残留する炭素繊維もある
- ・繊維周辺に多くの空隙がある

②機械的性質に関して

繊維の混入によってセラミックスに延性的な性質が付与された。しかし破壊強度は繊維無混入の試験体に比べて半分程度まで低下しているものも見られた。これは既往研究より指摘されているとおり、繊維強化手法が均質

なマトリクスを不均質にする操作であるためと考えられる。またその他の原因としては、繊維周辺に空隙が存在することによる実断面積の減少が考えられる。

3. まとめ及び今後の展望

本研究より得られた知見を以下にまとめる。

- ・繊維を混入により焼成時の陶磁器質の体積及び重量の変化率を低減することができた
 - ・繊維の混入により陶磁器質の靱性の向上が見られた
- また以上の性質から、繊維強化セラミックスは以下のような製品への適用が考えられる。

- ・耐荷重性タイル
- ・耐局部衝撃性タイル
- ・大型セラミックパネル
 - －屋根葺材
 - －コンクリート工用捨て型枠

4. 繊維補強セラミックスによる空間

4.1 概要

山口県萩市に、萩焼に着目した建築物を構想した。全体計画は窯炉内における火炎の流れに着目した。建

表 4.1 建築概要

敷地	山口県萩市
建築用途	温泉施設
規模	1 階建 一部半地下
敷地面積	5,100 m ²
建築面積	2,630 m ²

築概要を表 4.1 に、俯瞰写真を写真 4.1 に示す。また陶磁器質の火と水に強い特性に着目し、建築用途は温泉施設とした。

4.2 萩焼

萩焼はほくほくと柔らかく、色味を帯びた白さと微細なひび割れを特徴とする(写真4.2).

4.3 材料

材料には萩近郊で採取される大道土、金峯土、見島土を混合した胎土を用いる。釉薬はポピュラーな萩焼に用いられる藁灰白萩釉とし、これらに炭素繊維を混入することで陶磁器質の高靱化を図る。

3.4 工法

本案の工事は以下の手順で行う(図4.1)。なおこの手法は中世の半地下式穴窯の建設手法を参考にした。

- ①帯状の粘土を積み、木構造物を包む
- ②焼成後開口部となる箇所は耐火物で蓋をする
- ③木構造物を燃やし、空間を加熱する
- ④残留物及び耐火物を撤去し、建築空間を得る

3.5 空間構成

平面図及び断面図を図4.2に示す。本案は傾斜地に建設することを想定しており、その高低差によって焼成時の通気が行われる。ただし窯炉内は火炎が流れすぎると温度が上昇せず、また火炎が流れにくいと空気が供給されずに不完全な燃焼となる。したがって本案では傾斜地を利用した穴窯内の被加熱物の配置形式を参照すること

でこれを解決することとした。斜面と垂直方向の壁には火炎の流れを抑制する隔壁を設け、斜面と平行方向の壁には火炎の流れを妨げない多孔質な壁を設けた。またその開口部と相俟って室間の関係を制御するような起伏を床面に与えた。そして壁体の配置によって生じた器のように丸みを帯びた空間を浴室とし、その隙間となる空間を休憩スペースとした。この建築物内では小川が流れ、留まり、無釉の部分には植物が茂り、テーブル上には火が灯され、蒸気には光が注ぐ。すなわち静的で安定した空間に自然現象が彩りや移ろいを与えており、やきもの特性が建築空間レベルまで昇華されている(写真4.3).

5. おわりに

本提案をきっかけに建築分野における高靱性セラミックス製品の開発や、フォーリーや茶室の製作といった現実的なスケールの試みに繋がることを期待している。

謝辞

本研究に炭素繊維及びアルミナ繊維を提供して下さった三菱樹脂株式会社の安藤達夫様に深謝致します。

参考文献

香川 豊, 八田 博志「セラミックス基複合材料」アグネ承風社, 1990.6
窯業協会「窯業工学ハンドブック」技報堂, 1966.1



写真4.1 俯瞰写真

写真4.2 萩焼

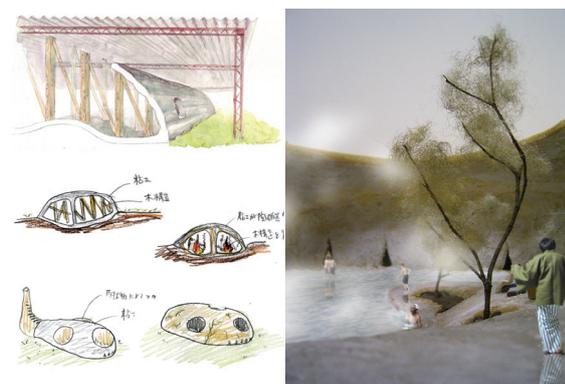


図4.1 工法概要

写真4.3 模型写真

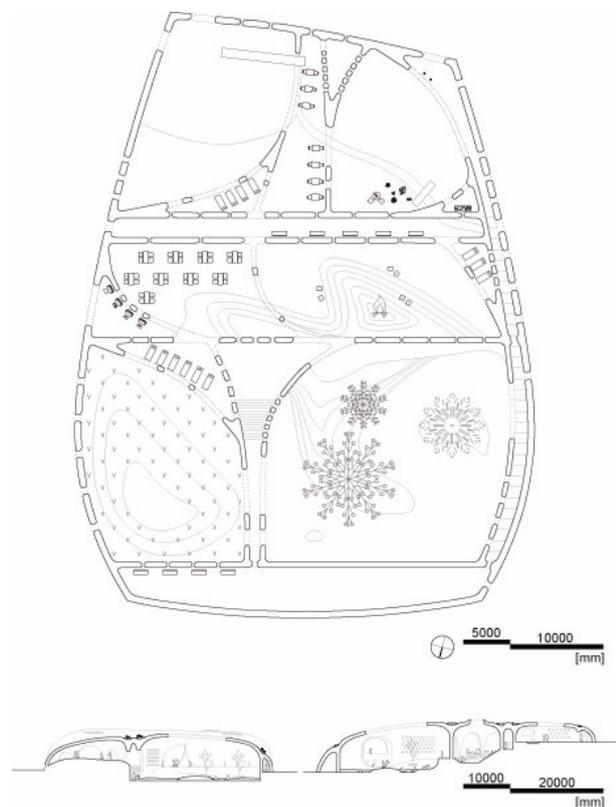


図4.2 平面図及び断面図