

令和 5 年 5 月 15 日現在

機関番号：13102

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2022

課題番号：21K18745

研究課題名（和文）微小ガラスビーズの自己膠結作用のメカニズム解明と地盤工学的利用

研究課題名（英文）Mechanism of self-cementation of small glass beads and its use in geotechnical engineering

研究代表者

豊田 浩史（Toyota, Hirofumi）

長岡技術科学大学・工学研究科・教授

研究者番号：90272864

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）： 長期間圧密したガラスビーズの地盤工学的利用の可能性を検討するため、室内要素試験である飽和非排水繰返し三軸試験、局所微小ひずみ測定試験、ベンダーエレメント試験及び静的貫入試験を実施した。これらの結果を既往研究で行われた豊浦砂と比較して、ガラスビーズの時間依存性を検証した。その結果、以下のことがわかった。

1. ガラスビーズの液状化抵抗とせん断剛性率は豊浦砂より大きい。さらに、ガラスビーズでは、長期圧密によりそれらの値が1.5倍程度まで2週間程度かけて増加した。
2. ガラスビーズの排水せん断強度と貫入抵抗値は豊浦砂より小さい。ガラスビーズと豊浦砂の時間依存性はほとんど観測できなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

全国で年間約60万トンにも及び使用済みガラスびんが再利用されず、埋め立てなどによる廃棄処理をされているのが現状である。このような状況の中、廃ガラスを土木分野で広く利用するためには、粉砕・加工ガラスの地盤工学的性質を把握することが重要である。そこでガラスビーズ供試体を豊浦砂と比較することで、廃ガラス利用に対して、次のような基礎知見を得た。ガラスビーズには液状化抵抗とせん断剛性率を増加させる作用が確認できた。このことを利用した地盤改良が期待できる。しかしながら、排水せん断強度と貫入抵抗値は通常の砂より小さくなるため、せん断強度を期待する利用には注意が必要である。

研究成果の概要（英文）：The cyclic undrained triaxial test to examine liquefaction properties, local small strain and bender elements tests to examine small deformation properties, and static penetration test to examine static penetration resistance were conducted to investigate the possible geotechnical use of long-term consolidated glass beads. Time dependence effects of the glass beads specimen were examined comparing with the results obtained from Toyoura sand specimen. As a result, this study has revealed the following findings.

1. Liquefaction resistance and shear modulus in glass beads were greater than those in Toyoura sand. Those values increased for about two weeks in glass beads: the values finally reached about one and a half times more than the initial values.
2. Drained shear strength and penetration resistance in glass beads were smaller than those in Toyoura sand. Those values of glass beads didn't exhibit the time dependence as well as Toyoura sand.

研究分野：地盤工学

キーワード：ガラスビーズ 膠結作用 せん断剛性率 三軸試験 間隙水質 土質改良

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

若い埋立地盤は液状化被害を受けやすく、古くなると強くなるという事実を力学的に解明するため、砂の年代効果について研究を進めている。実際に、豊浦砂の三軸液状化試験でも、蒸留水中で長期圧密を行えば、初期せん断剛性率はほとんど増加しないが、液状化強度は増加する不思議な現象が見られた。自然由来の砂の力学特性の何が変化しているのか調べる中で、安定した材料として、同等の粒径のガラスビーズを用いたところ、結果は、ガラスビーズのせん断剛性率が、時間とともに増加していく予想に反する結果が得られた。ガラスビーズのせん断剛性率が時間とともに増加していくメカニズムは、大変興味深いものである。水中養生前後でガラスビーズのSEM撮影を行ったところ、養生後は粒子の膠結が起きていることがわかった。したがって、ガラスビーズが水中で時間とともに膠結していく現象のメカニズムを解明することにより、廃ガラス処理として、地盤中に粉碎ガラスを混入することで、地盤改良等の地盤工学的利用の可能性について研究を行う。

2. 研究の目的

ガラスビーズの自己膠結作用は、背景で説明したとおりである。豊浦砂でガラスビーズ1ヶ月圧密と同等のせん断弾剛性率増加を得るためには、質量比で約1%弱のセメントを混入する必要がある。埋設管の埋戻土が液状化するのを防ぐために、セメントを数%混入する手法は一般的である。セメントを混入することなく、液状化の心配のない埋戻土を作れることは、大変興味深い。本研究では、ガラスビーズ試料の力学特性の変化(三軸試験、ベンダーエレメント試験、貫入試験)、間隙水質の変化(イオンクロマトグラフ)、析出物の分析(X線回折)を行い、自己膠結作用のメカニズムを解明する。これらの成果は、廃ガラスの処理法(地盤材料や地盤改良としての利用)の基礎データとなり、発展性は大きい。

3. 研究の方法

(1) 使用した試料

本研究では、ガラスビーズと豊浦砂を試料として用いて、漏斗堆積法及び負圧法により、供試体を作製した。各試料の物理的特性および粒径加積曲線を表1、図1に示す。なお、本研究では板ガラス、瓶ガラス等に広く用いられているソーダ石灰ガラスを球形に加工したものをガラスビーズとして使用した。

(2) 繰返し非排水三軸試験

供試体を作製後、二重負圧および通水を行い十分に飽和化させる。間隙圧係数 $B > 0.95$ を確認後、平均有効主応力 $p' = 50$ kPa の等方圧密を行った。なお、停電時にコンプレッサーからの圧力供給がなくても実験を継続できるように、背圧载荷は行わない。所定の圧密期間終了後、軸ひずみ速度 0.1 mm/min で繰返し载荷を行った。試験は、両振幅軸ひずみ $DA = 5\%$ に達した時点に液状化したものと定義し、繰返し载荷回数 N_c を算定した。長期圧密実施時は試験後に飽和度が低下していないことを確認している。30~60分程度の圧密条件(以下、通常圧密とする)で液状化強度曲線を作成し、長期圧密試料はこの液状化強度曲線と平行になるという仮定で、特定の繰返し応力比の実験のみから、長期圧密による液状化強度特性の変化を評価した。

(3) ベンダーエレメント(BE)試験

三軸試験で、長期圧密中の供試体の初期せん断剛性率 G_0 の変化を調査するため、BE試験を実施した。供試体上下端中央に設置したBEよりせん断波を送受信し、計測されたせん断波速度 V_s から G_0 を算出した。なお、 V_s の計測は圧密開始10分後から所定の圧密期間まで毎日実施した。BE試験では、BE先端間距離をとる tip-to-tip 法、送受信波形の立ち上がり点を結ぶ start-to-start 法を用いて波形記録より同定した。初期せん断剛性率 G_0 は次式より算出した。

$$V_s = L / t$$

$$G_0 = \rho_t V_s^2$$

ここで、

V_s : せん断波速度(m/s), L : BE間距離(mm), t : せん断波到達時間(msec), G_0 : 初期せん断剛性率(kPa), ρ_t : 湿潤密度(g/cm^3)である。

(4) 局所微小ひずみ(LSS)試験

三軸試験により長期圧密された砂供試体の微小変形特性を調べるため、非接触型の局所変位計を供試体に直接取り付け、軸および側方方向の変形量を測定することで局所せん断ひずみ ϵ_s を

表1: 試料の物性値

	ガラスビーズ	豊浦標準砂
初期相対密度	40	40
$D_{ref}(\%)$	40	40
初期間隙比	0.670	0.761
e_0	0.670	0.761
土粒子密度	2.487	2.650
$\rho_s (g/cm^3)$	2.487	2.650
最大乾燥密度	1.582	1.645
$\rho_{max} (g/cm^3)$	1.582	1.645
最小乾燥密度	1.452	1.335
$\rho_{min} (g/cm^3)$	1.452	1.335
粒径(mm)	0.2	2.0~0.076

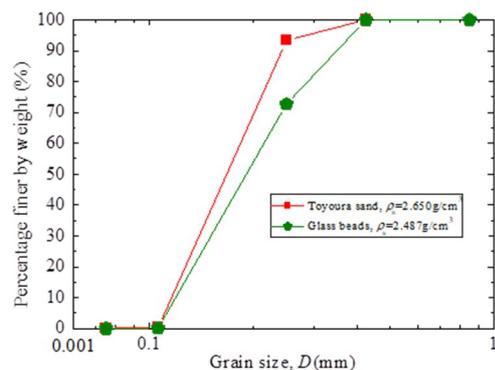


図1: 試料の粒径加積曲線

算定した。供試体作製から圧密までの過程は通常の三軸試験と同様である。所定の圧密期間終了後、排水条件の単調載荷試験（軸ひずみ速度 0.025 mm/min）を実施し、 $\varepsilon_s=1\%$ 程度までの割線せん断剛性率 $G(\text{MPa})$ を下記の式により算定する。

$$\varepsilon_s=2/3(\varepsilon_a-\varepsilon_r)$$

$$G=q/3\varepsilon_s$$

ここで、 ε_a ：軸ひずみ、 ε_r ：側方向ひずみ、 q ：軸差応力(MPa)である。

(5) 室内静的貫入試験

図 2 に試験装置の概要を示す。載荷装置は着脱可能で、供試体設置後の乱れを起こさず、試験の実施が可能である。また、貫入棒の先端は平滑であり、貫入棒と貫入ロッドは同径に設定した。高さ $H=123.5 \text{ mm}$ 、直径 $D=104 \text{ mm}$ のモールドで供試体を作製した。なお、モールド底部にはポーラスストーンを設置し、下部からの通水を可能としている。表面成形後、アクリル製のスペーサを挟み、錘により上載圧 10 kPa を載荷する。その後、通水飽和させ、所定期間水中養生させた後、直径 10 mm の貫入棒を貫入速度 0.25 mm/min で貫入することで貫入力を測定する。上載圧を与えた状態で試験を実施するため、錘中央には貫入ロッドを通す直径 15 mm の孔を設けている。なお、供試体上部からの貫入量が 40 mm 程度になったことを目安に試験を終了している。本試験では、通常圧密の養生期間を、供試体への通水が完了してから 1 日養生させたものとした。

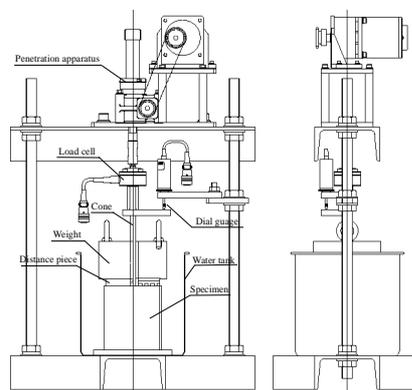


図 2：室内静的貫入試験装置模式図

(6) 溶出試験

本研究では、長期養生された試料から溶出される物質を調べるために、一か月間水中で養生させたガラスビーズ、蒸留水に対してイオンクロマトグラフィーによる成分分析を行った。

(7) 赤外分光分析試験

本研究では長期間水中に浸潤されたガラスビーズから析出された物質を調べることを目的とし、赤外分光分析試験を行った。

4. 研究成果

(1) 繰返し非排水三軸試験

液状化試験より得られた各試料の液状化強度曲線を図 3 に示す。図より、豊浦砂と比較してガラスビーズの液状化強度曲線が高いことがわかる。これは相対密度を合わせたとしても、ガラスビーズの粒子形状が球形であるため、初期間隙比が小さくなっているためだと考えられる。また、ガラスビーズおよび豊浦砂の両ケースで長期圧密により、繰返し載荷回数 N_c が増加する傾向が確認できる。特にガラスビーズは、1 週間程度で急激に液状化強度が増加している。このことから、液状化強度比 R_L は圧密時間に依存性があるといえる。そこで、各試料の長期圧密に与える液状化強度増加率を考察した。液状化強度増加率は、式(1)で定義し、液状化強度の増加量を評価する。なお、長期圧密試料は繰返し応力比を 1 ケースしか実施していないため、液状化曲線は、通常圧密試料と平行になると仮定して R_L を求めた。式からわかるように、通常圧密の液状化強度増加率は 1.0 である。

$$\text{液状化強度増加率 } R_{LC} = \frac{\text{長期圧密の } R_L}{\text{通常圧密の } R_L} \quad (1)$$

図 4 に液状化強度増加率 R_{LC} と圧密時間の関係を示す。ガラスビーズの R_{LC} は、ガラスビーズでは

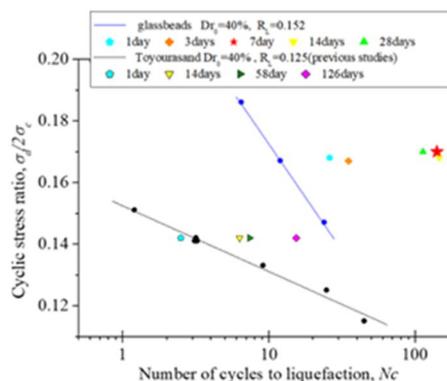


図 3：液状化強度曲線

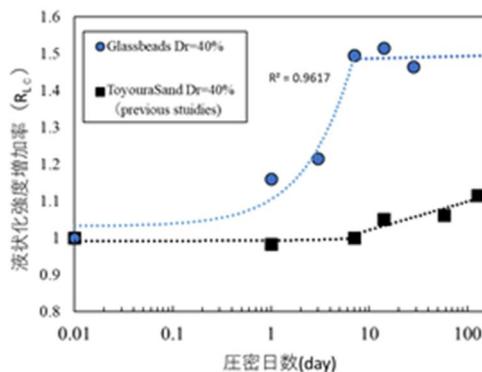


図 4：液状化強度比の時間増加

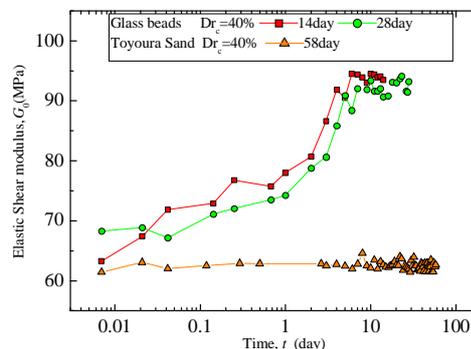


図 5： G_0 の時間増加

1 週間以内で急激に曲線的に増加し、1 週間以上で一定となっている。一方、豊浦砂では1 週間以内では一定であるが、1 週間以上になると微増する傾向が確認できる。これらより、ガラスビーズには、液状化強度を短時間で増加させる作用があることが判明した。

(2) BE 試験

液状化強度増加のメカニズムを探るため、BE 試験により得られた初期せん断剛性率 G_0 と圧密時間 t_c の関係を図 5 に示す。図より、豊浦砂で圧密時間の変化が見られないのに対し、ガラスビーズでは1 週間程度まで増加する傾向が見られる。これらは、写真-1 に示すようなガラスビーズの粒子固結作用が働いたものと考えられる。一般的に地盤を固化することでせん断剛性率や液状化抵抗は増加することが知られている。1 週間以上の圧密を行ったガラスビーズ試料には微量ではあるが、固結したガラスビーズ析出物がまばらに混入していた（指で固結を崩すことができる程度の固さ）。これらの析出物により、液状化抵抗とせん断剛性率が増加する要因になったことが考えられる。

(3) LSS 試験

次に、LSS 試験により、微小ひずみ域でのせん断剛性率への影響について調査した。図 6 に割線せん断剛性率 G とせん断ひずみ ε_s の関係を示す。図より、長期圧密を与えたガラスビーズは $\varepsilon_s = 0.001\%$ 以下とされる弾性ひずみ域での G の値は大きく増加しており、 $\varepsilon_s = 0.1\%$ 付近まで同一ひずみレベルで通常圧密よりも高い剛性である。また、ガラスビーズにおいて1 週間圧密と2 週間圧密の結果は同程度であった。このことから、1 週間程度で固結が完了することが考えられる。また、BE 試験で求めた G_0 と便宜上 $\varepsilon_s = 0.0001\%$ に示されている弾性ひずみ域での G の値は概ね同等の結果であることがわかる。

図 7 に排水状態での大ひずみまでの結果（せん断強度を示す。この結果より、液状化強度はガラスビーズが高いのに対し、排水せん断強度はガラスビーズの方が $1/2$ 程度と小さくなる）がわかる。これはガラスビーズが球形であるため、粒子間ですべりやすいためと考えられる。また、ガラスビーズおよび豊浦砂の両ケースで2 週間圧密と通常圧密で同等の強度を示している。このことから、排水せん断強度には圧密時間の依存性がないことが推測させる。つまり、固結の影響が現れるのは、ある程度小さなひずみ（図 6 によると 0.1% 程度まで）のようである。

(4) 室内静的貫入試験

そこで、同じ強度という観点から、棒貫入試験により貫入抵抗の変化について検証した。図 8 に貫入長さ $L_c = 30\text{mm}$ の貫入抵抗値（以下 q_{c30} と表記する）と圧密時間の関係を示す。図より、ガラスビーズは最大 365 日、豊浦砂は最大 112 日の養生を行ったが、貫入抵抗値 q_{c30} の変化はガラスビーズおよび豊浦砂の両ケースで圧密時間に対してあまり変化が見られない。このことから、貫入抵抗値は両ケースで圧密時間の影響はないと考えられる。これらより、ガラスビーズは液状化強度およびせん断剛性率で長期圧密による増加が確認されたのに対して、排水せん断強度と貫入抵抗値では長期圧密による変化は観測できなかった。この理由として、ガラスビーズに粒子固結作用は、大き

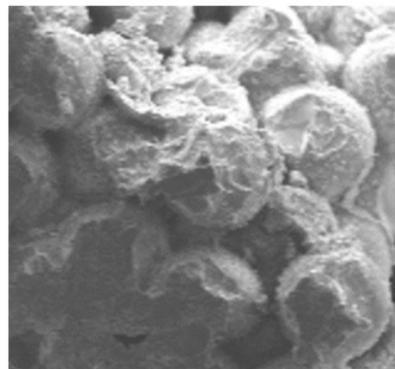


写真 1：ガラスビーズの固結

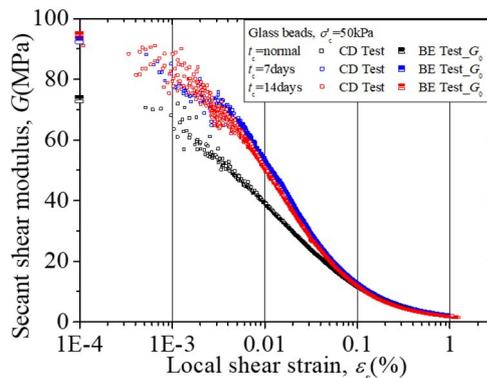


図 6：G のひずみ依存性

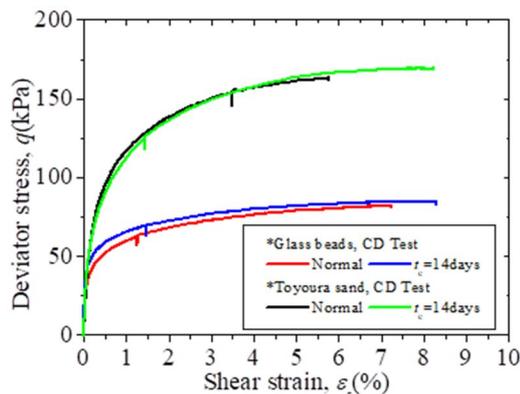


図 7：せん断強度試験結果

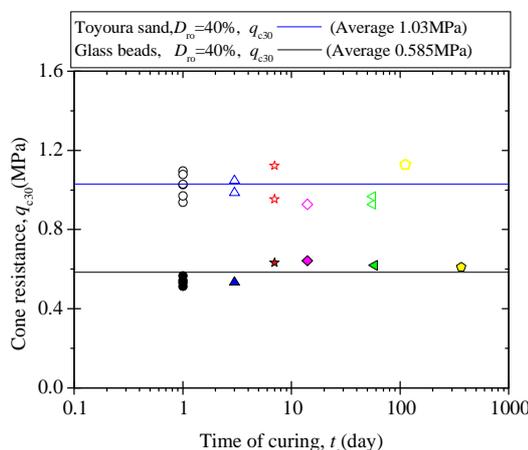


図 8：貫入抵抗値の時間変化

なひずみレベルでは、粒子固結が簡単に崩れてしまうことが考えられる。また、ガラスビーズおよび豊浦砂の両ケースの平均値を見ると、豊浦砂よりガラスビーズの貫入抵抗値が1/2程度小さいことがわかる。これは、排水せん断強度と同等の差であることから、貫入抵抗値と排水せん断強度には関連性があるといえる。

(5) 溶出試験

豊浦砂とガラスビーズの物質構成を表2に示す。いくつかの違いはあるが、ここでは、カルシウム Ca について着目する。ガラスビーズには10%程度カルシウム Ca が含まれているのに対し、豊浦砂にはほとんど含まれていないことがわかる。そこで、イオンクロマトグラフィーを用いてカルシウムイオン Ca^{2+} の溶出量を計測した。蒸留水からは何も検出されなかったのに対し、ガラスビーズからはカルシウムイオン Ca^{2+} が17mg/L程度検出された。このことよりカルシウムイオン Ca^{2+} の溶出が析出物の発生、およびガラスビーズの固結に関わっていると考えられる。

(6) 赤外分光分析試験

図9に赤外分光分析により得られた未使用のガラスビーズとガラスビーズ析出物のIRスペクトルを示す。図よりガラスビーズ析出物のIRスペクトルにおいて、炭酸カルシウム $CaCO_3$ のピーク値(波数: $1500cm^{-1}$) 近辺に小さなピークが確認されることより、 $CaCO_3$ が含まれていることが分かった。このことより、ガラスビーズから溶け出した Ca^{2+} と水に溶けた二酸化炭素 CO_2 により炭酸イオン CO_3^{2-} が生成され、これらが結合し $CaCO_3$ を生成したことが析出物発生の原因だと考えられる。

5. 結論

本研究では、廃ガラスを地盤材料として使うため、ガラスビーズ試料の基礎的性質と力学特性の把握を行った。

ガラスビーズ(ソーダ石灰ガラス)を水中(本研究では蒸留水)で養生すると、析出物により、粒子の固結作用が発生することがわかった。

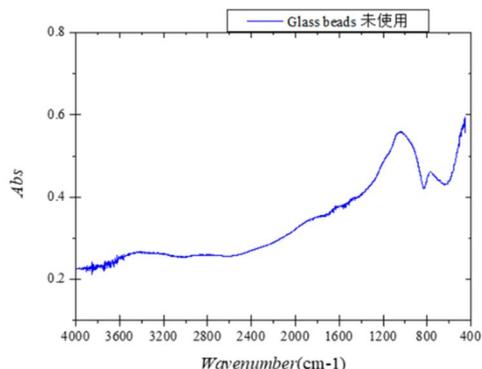
この固結が現れる原因として、ガラスビーズ中の Ca^{2+} が水に溶け出し(計測済み)、二酸化炭素 CO_2 により炭酸イオン CO_3^{2-} が生成され、これらが結合し $CaCO_3$ を生成(計測済み)したと考えられる。

この固結による力学特性の変化として、この固結は1週間程度で収束していた。液状化強度とせん断剛性率は、1.5倍程度まで上昇することがわかった。ただし、せん断強度や貫入抵抗値にはあまり変化が見られなかった。これは、比較的ひずみの小さいときには固化の影響が現れるが、ひずみが大きくなると、この固化が壊されるためか、力学特性に変化が現れなくなる。

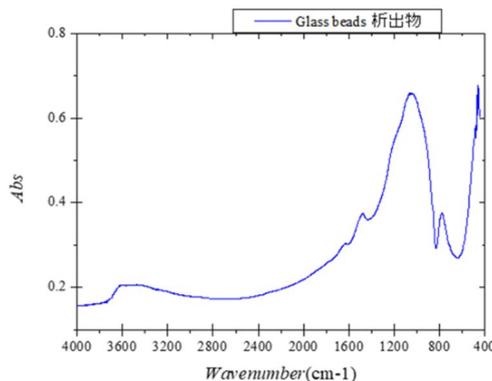
このように、固化の影響はある程度限定的ではあるが、ガラスビーズにより、力学特性が改善される結果が見られた。(注: 粒子が球形であるため、せん断強さは小さくなる。せん断強さを上げるためには、角張った形にすることが望ましい。ただし、球形だと液状化強度が上昇する結果が見られている。) 以上より、廃ガラスを地盤材料として利用することは十分に可能であることがわかった。

表2: 試料の物質構成

豊浦砂 (%)		ガラスビーズ (%)	
ig,loss	0.5	C	8.6
SiO ₂	92.6	O	29.0
Al ₂ O ₃	3.7	Na	7.5
Fe ₂ O ₃	0.7	Mg	1.4
CaO	0.5	Al	1.1
MgO	0.2	Si	40.5
		K	1.2
		Ca	10.7



(a): 未使用ガラスビーズ



(b): ガラスビーズ析出物

図9: IR スペクトル結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	小松 俊哉 (Komatsu Toshiya) (10234874)	長岡技術科学大学・工学研究科・准教授 (13102)	
研究分担者	杉本 光隆 (Sugimoto Mitsutaka) (50196755)	長岡技術科学大学・工学研究科・教授 (13102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関