

窯業系サイディング廃材を用いた再生ガラス質系資材への水平リサイクル化

DB14179 鈴木悠人

1. はじめに

近年、新設住宅の外壁素材はモルタル仕上に代わり、施工が容易なこと、デザインが豊富であること、耐火性・耐久性に優れることから、窯業系サイディングが主として使用されており、新設住宅の約 8 割近くで使用されている。国内では年間に約 1 億㎡以上出荷、1995 年から 2014 年までの 20 年間で約 22 億㎡の窯業系サイディングが出荷されているが、窯業系サイディングの廃材については有効な再利用方法が確立されておらず、ほとんどが廃棄処分とされている。そこで本研究では、窯業系サイディングの廃材の再利用方法として、ロックウールを用途として考える高炉スラグ系材料、ガラス系を用途として考えるガラス系材料、タイルガラス被膜としての再利用方法を考案し、資源循環や産業廃棄物削減への貢献を目的として研究を行う。

2. 各種建材としての再生材用途の可能性検討（研究 1）

2.1 グラスウール・ロックウール市場占有、出荷量、工場分布

図 2a にロックウール工場分布を示す¹⁾²⁾。国内の住宅用断熱材ではグラスウールが最も多く 55.3%、ロックウールが 11.4%というシェア率になっている。シェア率はグラスウールが最も多いが、グラスウールは主原料の 80%以上にリサイクルガラスを使用しており、現時点でリサイクルガラスを利用した資源循環としての形が確立していると考えられる。国内でロックウールを生産している工場は 3 つ存在しており、ロックウールは 2015 年には約 27 万トン出荷され年々需要を伸ばしている。2015 年には住宅用断熱材、耐火被覆材としてそれぞれ約 9 万トン、吸音天井板及び成形品が約 3 万トン、その他繊維が約 1 万トン出荷されており、合計で約 26 万トン出荷されているので窯業系サイディングの廃材をロックウールとして再利用する価値はあると考えられる。

2.2 高炉分布及び地域別高炉スラグ利用統計

図 2b に高炉工場分布¹⁾、図 3 に地域別高炉スラグ利用統計を示す³⁾。高炉を生産する製鉄所は全国で 14 つ存在する。図 2 は高炉スラグの地域別生産量と高炉スラグ利用統計を元にグラフを作成している為、実際の地域ごとの利用統計とは異なるが、高炉スラグはセメント用に用いられる量が最も多く、ロックウールとしての利用量は全体で 23 万トンとなっている。窯業系サイディングの廃材をセメントに混ぜ、コンクリートに使用している例もあるが、含まれている有機繊維がコンクリートの強度を落としてしまう危険性があるとの事だった為、本研究ではロックウールとしての利用を考える。

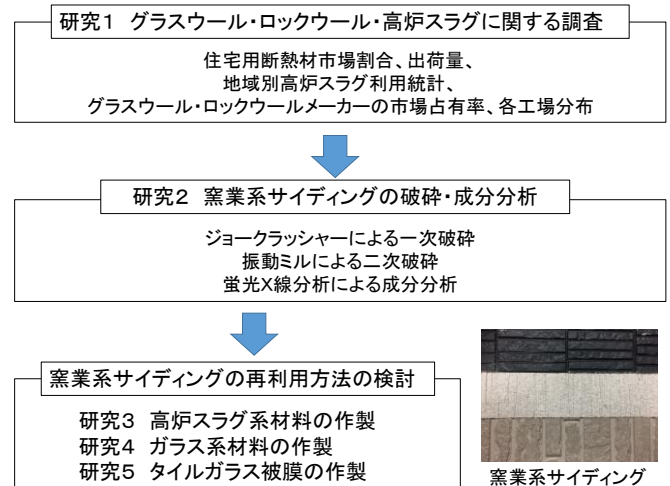


図 1 研究フロー

表 1 使用材料

分類	項目	主原料
窯業系サイディング 廃材	標準窯業系サイディング	F セメント、ケイ酸質原料、有機繊維【ファイバー7.8%（重量比）】、混和材
	木チップ含有 窯業系サイディング	W セメント、ケイ酸質原料、有機繊維【木チップ27%（重量比）】、混和材

表 2 実験要因と水準

項目	実験要因	実験水準
研究 1	文献調査・ヒアリング 調査項目	グラスウール・ロックウール・鉄鋼メーカーHP、外装施工専用工事業者
研究 2 窯業系サイディング 破碎	ジョークラッシャー 破碎回数	1 回、2 回、3 回
	振動ミル破碎回数	20 秒一定 1 回
研究 3 高炉スラグ系材料 作製	焼成温度	1600℃
	品質評価	密度 (g/cm³)、蛍光 X 線分析
研究 4 ガラス系材料作製	焼成温度	1600℃
	品質評価	密度 (g/cm³)、蛍光 X 線分析
研究 5 タイルガラス被膜 作製	焼成温度	1050℃、1150℃
	焼成時間	1 時間、2 時間、3 時間
	被膜施工厚さ	1mm、2mm、3mm、4mm
	色調用・副産原料添加物	フェロニッケルスラグ、銅スラグ
	品質評価	密度 (g/cm³)、蛍光 X 線分析、色差、光沢度

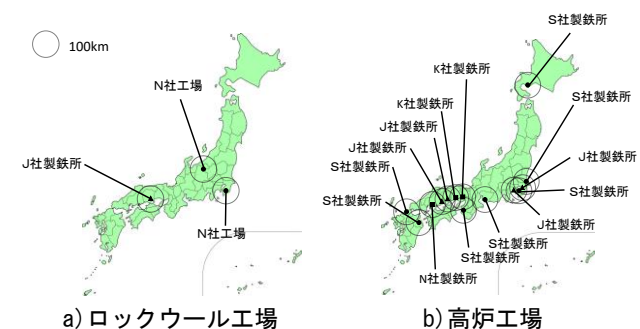


図 2 再利用に関係する各工場分布

3. 窯業系サイディング廃材の再利用方法の検討

3.1 窯業系サイディングの破碎（研究2）

写真1に各破碎機、振動ミルでの破碎状況を示す⁴⁾。新たな素材として再利用する際に、廃材の破碎は必要不可欠なため本研究ではジョークラッシャーによる1次破碎と振動ミルによる2次破碎を行う。ジョークラッシャーによる破碎の場合、Fは薄く層状に破碎され、Wはブロック状に破碎される。振動ミルによる破碎の場合ではFは完全な粉末状にすることが出来るが、Wは含有されている木チップが元の状態のまま残ってしまい完全な粉末状にすることは出来なかった。

3.2 窯業系サイディングの成分分析

図4に窯業系サイディングの成分と高炉スラグ、ソーダ石灰ガラスの蛍光X線分析による成分比較を示す。窯業系サイディングを構成する主成分は二酸化ケイ素(SiO_2)と酸化カルシウム(CaO)であり、窯業系サイディングと高炉スラグの成分を比較すると、成分がよく似ていることがわかる。次にソーダ石灰ガラスと窯業系サイディングの成分を比べると、ソーダ石灰ガラスは窯業系サイディングに比べ二酸化ケイ素の値が大きく、酸化ナトリウム(Na_2O)が含まれているが、含まれている成分は似ていることがわかる。

3.3 窯業系サイディングの利用方法の検討

蛍光X線分析による成分分析結果から、高炉スラグとガラス系材料に成分が近いことが分かった。そのため本研究では窯業系サイディングの破碎物をそのまま焼成させる高炉スラグ系材料、窯業系サイディングの破碎物に炭酸ナトリウム(Na_2CO_3)を加えガラス化させるガラス系材料、ガラス化させタイルの釉薬としての利用を想定したタイルガラス被膜の3通り(研究3・4・5)の利用方法を検討し研究を行う。

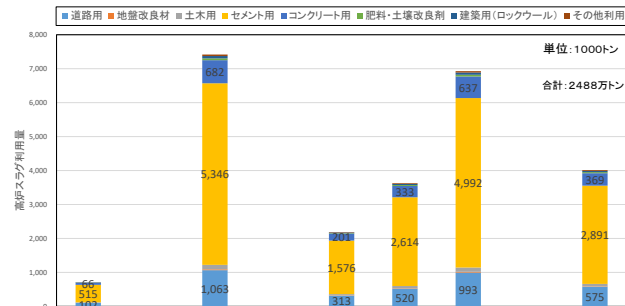


図3 地域別高炉スラグ利用統計

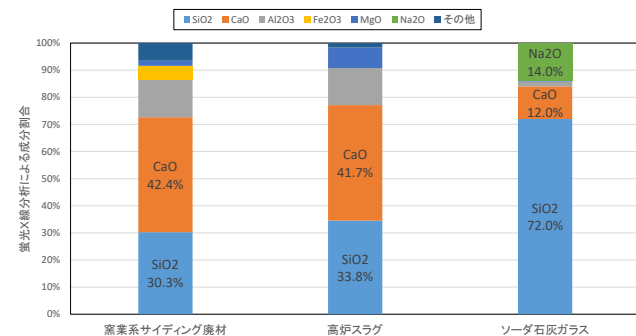


図4 蛍光X線分析による窯業系サイディングの成分比較

表3 実験項目と方法

項目		方法
研究1	文献調査	生産場所、生産量、利用量、
		全国北海道～九州のグラスウール、ロックウールメーカー5社から抽出
研究2	破碎機による窯業系サイディングの廃材の破碎	利用量 利用統計
		高炉スラグ利用量、地域別高炉スラグ利用統計を高炉メーカー4社から抽出
研究3	高炉スラグ系材料作製	ジョークラッシャーによる1次破碎
		窯業系サイディングFとWをジョークラッシャーにいれ、20mm以下作製
研究4	ガラス系材料作製	振動ミルによる2次破碎
		ジョークラッシャーで破碎した窯業系サイディングFとWを振動ミルに入れ、2mm以下作製
研究5	タイルガラス被膜作製	電気炉による焼成
		破碎したFとWを電気炉で焼成
研究6	タイルガラス被膜作製	品質評価
		密度 (g/cm ³) 成分分析
研究7	タイルガラス被膜作製	電気炉による焼成
		体積法による密度 (g/cm ³) 測定
研究8	タイルガラス被膜作製	品質評価
		密度 (g/cm ³) 成分分析
研究9	タイルガラス被膜作製	電気炉による焼成
		体積法による密度 (g/cm ³) 測定
研究10	タイルガラス被膜作製	品質評価
		密度 (g/cm ³) 成分分析
研究11	タイルガラス被膜作製	電気炉による焼成
		体積法による密度 (g/cm ³) 測定
研究12	タイルガラス被膜作製	品質評価
		密度 (g/cm ³) 成分分析
研究13	タイルガラス被膜作製	電気炉による焼成
		体積法による密度 (g/cm ³) 測定
研究14	タイルガラス被膜作製	品質評価
		密度 (g/cm ³) 成分分析
研究15	タイルガラス被膜作製	電気炉による焼成
		体積法による密度 (g/cm ³) 測定
研究16	タイルガラス被膜作製	品質評価
		密度 (g/cm ³) 成分分析
研究17	タイルガラス被膜作製	電気炉による焼成
		体積法による密度 (g/cm ³) 測定
研究18	タイルガラス被膜作製	品質評価
		密度 (g/cm ³) 成分分析
研究19	タイルガラス被膜作製	電気炉による焼成
		体積法による密度 (g/cm ³) 測定
研究20	タイルガラス被膜作製	品質評価
		密度 (g/cm ³) 成分分析
研究21	タイルガラス被膜作製	電気炉による焼成
		体積法による密度 (g/cm ³) 測定
研究22	タイルガラス被膜作製	品質評価
		密度 (g/cm ³) 成分分析
研究23	タイルガラス被膜作製	電気炉による焼成
		体積法による密度 (g/cm ³) 測定
研究24	タイルガラス被膜作製	品質評価
		密度 (g/cm ³) 成分分析
研究25	タイルガラス被膜作製	電気炉による焼成
		体積法による密度 (g/cm ³) 測定
研究26	タイルガラス被膜作製	品質評価
		密度 (g/cm ³) 成分分析
研究27	タイルガラス被膜作製	電気炉による焼成
		体積法による密度 (g/cm ³) 測定
研究28	タイルガラス被膜作製	品質評価
		密度 (g/cm ³) 成分分析
研究29	タイルガラス被膜作製	電気炉による焼成
		体積法による密度 (g/cm ³) 測定
研究30	タイルガラス被膜作製	品質評価
		密度 (g/cm ³) 成分分析
研究31	タイルガラス被膜作製	電気炉による焼成
		体積法による密度 (g/cm ³) 測定
研究32	タイルガラス被膜作製	品質評価
		密度 (g/cm ³) 成分分析
研究33	タイルガラス被膜作製	電気炉による焼成
		体積法による密度 (g/cm ³) 測定
研究34	タイルガラス被膜作製	品質評価
		密度 (g/cm ³) 成分分析
研究35	タイルガラス被膜作製	電気炉による焼成
		体積法による密度 (g/cm ³) 測定
研究36	タイルガラス被膜作製	品質評価
		密度 (g/cm ³) 成分分析
研究37	タイルガラス被膜作製	電気炉による焼成
		体積法による密度 (g/cm ³) 測定
研究38	タイルガラス被膜作製	品質評価
		密度 (g/cm ³) 成分分析
研究39	タイルガラス被膜作製	電気炉による焼成
		体積法による密度 (g/cm ³) 測定
研究40	タイルガラス被膜作製	品質評価
		密度 (g/cm ³) 成分分析
研究41	タイルガラス被膜作製	電気炉による焼成
		体積法による密度 (g/cm ³) 測定
研究42	タイルガラス被膜作製	品質評価
		密度 (g/cm ³) 成分分析
研究43	タイルガラス被膜作製	電気炉による焼成
		体積法による密度 (g/cm ³) 測定
研究44	タイルガラス被膜作製	品質評価
		密度 (g/cm ³) 成分分析
研究45	タイルガラス被膜作製	電気炉による焼成
		体積法による密度 (g/cm ³) 測定
研究46	タイルガラス被膜作製	品質評価
		密度 (g/cm ³) 成分分析
研究47	タイルガラス被膜作製	電気炉による焼成
		体積法による密度 (g/cm ³) 測定
研究48	タイルガラス被膜作製	品質評価
		密度 (g/cm ³) 成分分析
研究49	タイルガラス被膜作製	電気炉による焼成
		体積法による密度 (g/cm ³) 測定
研究50	タイルガラス被膜作製	品質評価
		密度 (g/cm ³) 成分分析
研究51	タイルガラス被膜作製	電気炉による焼成
		体積法による密度 (g/cm ³) 測定
研究52	タイルガラス被膜作製	品質評価
		密度 (g/cm ³) 成分分析
研究53	タイルガラス被膜作製	電気炉による焼成
		体積法による密度 (g/cm ³) 測定
研究54	タイルガラス被膜作製	品質評価
		密度 (g/cm ³) 成分分析
研究55	タイルガラス被膜作製	電気炉による焼成
		体積法による密度 (g/cm ³) 測定
研究56	タイルガラス被膜作製	品質評価
		密度 (g/cm ³) 成分分析
研究57	タイルガラス被膜作製	電気炉による焼成
		体積法による密度 (g/cm ³) 測定
研究58	タイルガラス被膜作製	品質評価
		密度 (g/cm ³) 成分分析
研究59	タイルガラス被膜作製	電気炉による焼成
		体積法による密度 (g/cm ³) 測定
研究60	タイルガラス被膜作製	品質評価
		密度 (g/cm ³) 成分分析
研究61	タイルガラス被膜作製	電気炉による焼成
		体積法による密度 (g/cm ³) 測定
研究62	タイルガラス被膜作製	品質評価
		密度 (g/cm ³) 成分分析
研究63	タイルガラス被膜作製	電気炉による焼成
		体積法による密度 (g/cm ³) 測定
研究64	タイルガラス被膜作製	品質評価
		密度 (g/cm ³) 成分分析
研究65	タイルガラス被膜作製	電気炉による焼成
		体積法による密度 (g/cm ³) 測定
研究66	タイルガラス被膜作製	品質評価
		密度 (g/cm ³) 成分分析
研究67	タイルガラス被膜作製	電気炉による焼成
		体積法による密度 (g/cm ³) 測定
研究68	タイルガラス被膜作製	品質評価
		密度 (g/cm ³) 成分分析
研究69	タイルガラス被膜作製	電気炉による焼成
		体積法による密度 (g/cm ³) 測定
研究70	タイルガラス被膜作製	品質評価
		密度 (g/cm ³) 成分

4. 窯業系サイディング廃材を用いた高炉スラグ系

ロックウール材料の作製（研究3）

4.1 高炉スラグ系ロックウール材料の試験体の作製

写真 2a、b に廃材 F 標準（ Na_2CO_3 0%）焼成前後の比較、写真 4c、d に廃材 W 木（ Na_2CO_3 0%）焼成前後の比較を示す。研究 2 で破碎した F と W を高温電気炉を用いて 1600°C を 2 時間維持した計 17 時間で焼成を行い、焼成後の様子を観察する。焼成した結果、F と W とでは焼成後の違いはあまり見られなかったが、共に焼成前は粉末状であったものが焼成後は硬質化した。また、黒く変色し表面は光沢があり、ひび割れた様な特徴が見られた。

4.2 高炉スラグ系ロックウール材料の品質評価

図 5 に焼成前後の体積、密度変化と高温電気炉内の温度変化、図 6a に廃材 F 標準（ Na_2CO_3 0%）、b に廃材 W 木（ Na_2CO_3 0%）の蛍光 X 線分析を併用した窯業系サイディング廃材の組成分析の結果を示す。F と W を焼成した結果、焼成前と比べ体積は小さくなり、密度は大きくなった。質量は共に減少したがこれは中に含まれていた有機繊維が焼成した結果なくなったものであると考えられる。蛍光 X 線分析の結果、焼成後の F（ Na_2CO_3 0%）は主成分が SiO_2 と CaO であった。高炉スラグの成分と比較すると、 Al_2O_3 が含まれておらず Fe_2O_3 がわずかに含まれているが、主成分は SiO_2 と CaO であったため、高炉スラグとしての利用価値はあると思われる。W（ Na_2CO_3 0%）も F（ Na_2CO_3 0%）と同じく SiO_2 と CaO が主成分であるという結果だった為、F（ Na_2CO_3 0%）と同様に高炉スラグ系材料としての利用価値はあると思われる。

5. 窯業系サイディング廃材を用いたガラス系材料の作製（研究4）

5.1 ガラス系材料の試験体の作製

写真 2e、f に廃材 F 標準（ Na_2CO_3 15%）焼成前後の比較を示す。研究 2 で破碎した F と W に炭酸ナトリウム（ Na_2CO_3 ）をそれぞれ 15% と 30% 加えたものを、高温電気炉を用いて 1600°C を 2 時間維持した計 17 時間で焼成を行い、焼成後の様子を観察する。焼成した結果、F（ Na_2CO_3 15%）はアルミナ（ Al_2O_3 ）のつぼが変形し、W（ Na_2CO_3 15%）、F（ Na_2CO_3 30%）、W（ Na_2CO_3 30%）は、つぼが溶け、割れ目から窯業系サイディングが流れ出したという結果になった。これは添加した炭酸ナトリウムが原因であると思われる。F（ Na_2CO_3 15%）は全体が白くなり、また体積が小さくなり硬質化した。

5.2 ガラス系材料の品質評価

図 9c に F（ Na_2CO_3 15%）の蛍光 X 線分析を併用した窯業系サイディング廃材の組成分析の結果を示す。分析の結果、廃材 F 標準（ Na_2CO_3 15%）は主成分が CaO と SiO_2 であり、ソーダ石灰ガラスの成分と比較すると CaO がより多く検出された。また、今回用いた蛍光 X 線分析装置ではナトリウム（Na）の検出が不可能な為、ナトリウムは表示できていない。



a) 廃材 F 標準（ Na_2CO_3 0%）
焼成前



b) 廃材 F 標準（ Na_2CO_3 0%）
焼成後



c) 廃材 W 木（ Na_2CO_3 0%）
焼成前



d) 廃材 W 木（ Na_2CO_3 0%）
焼成後

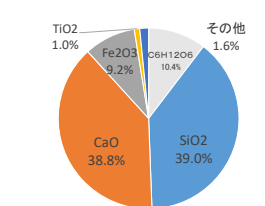


e) 廃材 F 標準（ Na_2CO_3 15%）
焼成前

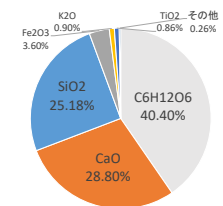


f) 廃材 F 標準（ Na_2CO_3 15%）
焼成後

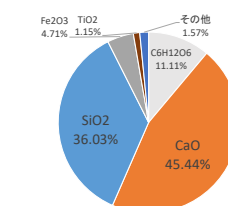
写真 2 高炉スラグ系材料焼成前後の比較



a) 廃材 F 標準（ Na_2CO_3 含有 0%）



b) 廃材 W 木（ Na_2CO_3 含有 0%）



c) 廃材 F 標準（ Na_2CO_3 含有 15%）

蛍光 X 線分析結果について
グラフ a、b、c は蛍光 X 線分析の結果と、焼成前の質量と有機繊維の重量比から割り出した $\text{CaH}_{12}\text{O}_6$ を加えた結果を示している。

図 6 蛍光 X 線分析を併用した窯業系サイディング廃材 F・W の
化学組成分析（研究 3・4）

6. 窯業系サイディング廃材を用いたタイルガラス被膜の作製（研究 5）

6.1 タイルガラス被膜の作製

写真 3 に焼成後のタイルガラス被膜の様子を示す。研究 2 で破碎した F と W に炭酸ナトリウムを加え水と練り合わせ、タイルの上に塗ったものを高温電気炉で焼成し、焼成後の様子を観察する。焼成した結果、F を焼成したものは未反応部分が多くみられたが、W を焼成したものは全体的にガラス化していた。しかし、表面にひび割れが生じており、透明度もあまりない為、機能性や意匠性が低く感じられる。

6.2 呈色させたタイルガラス被膜の作製

写真 4 に銅スラグを添加させ呈色させたタイルガラス被膜、写真 5 にフェロニッケルスラグを添加させ呈色させたタイルガラス被膜、図 7 に各試験体及び製品の色差、図 8 に各試験体及び製品の光沢度及び L* 値を示す。破碎した F と W に炭酸ナトリウムを加えたものに、銅スラグ、フェロニッケルスラグを添加した後に 6.1 と同様の手順を行い、焼成後の様子を観察する。焼成した結果、銅スラグを添加したものは赤黒く変色しガラス化した。フェロニッケルスラグは完全なガラス化にさせることが出来なかった。色差は Ni スラグ含有焼成タイルが b* 値が大きいので黄味が強く、Cu スラグ含有焼成タイルは a* 値が大きいので赤味が強い。光沢度は Cu スラグ含有焼成タイルが通常のタイルよりも強い光沢度を示した。L* 値は再生材料の中では含有無し焼成タイルが最も大きくなった。

7. まとめ

本研究において以下の知見を得ることが出来た。

- 1) 窯業系サイディング廃材は高炉スラグ系ロックウール材料としての利用価値はあると考えられる。
- 2) 窯業系サイディングを 1150℃、炭酸ナトリウム添加でガラス化させることは出来たが意匠性や機能性が低いと感じられる。
- 3) Cu スラグを添加することで a* 値が増加 Ni スラグを添加することで b* 値が増加した為、意匠性が向上できたと考えられる。
- 4) タイルガラス釉薬のひび割れを抑えることで内装用タイルとしての利用が可能と考えられる。

参考文献

- 1) 経済産業省「鉄鋼業の現状と課題」参照 2017 年 6 月 26 日
- 2) N 社 HP <https://www.nichias.co.jp/> 参照 2017 年 4 月 6 日
- 3) 鉄鋼スラグ協会 HP <http://www.slg.jp/> 参照 2017 年 4 月 6 日
- 4) 梅原優「窯業系サイディングの資源循環を可能にする再生材の研究」2016 年度日本建築学会関東支部研究報告集

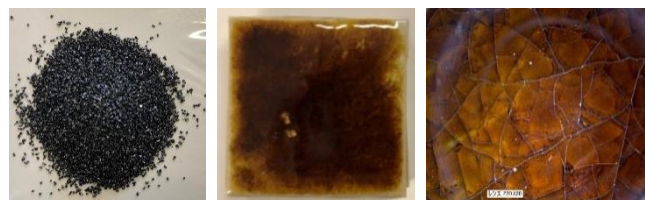
謝辞

本研究の実施にあたり、NP0 法人外装エコロジーシステム関係各位、埼玉県産業技術センター、ニチハ株式会社より、窯業系サイディングの提供、調査・議論等で多大な助力を賜り、感謝いたします。



a) 廃材 F 標準 (1150℃、1 時間焼成、2mm 塗厚、 $\text{Na}_2\text{CO}_3:50\%$) b) 廃材 W 木 (1150℃、1 時間焼成、2mm 塗厚、 $\text{Na}_2\text{CO}_3:50\%$) c) b の 3D 画像解析

写真 3 焼成後のタイルガラス被膜



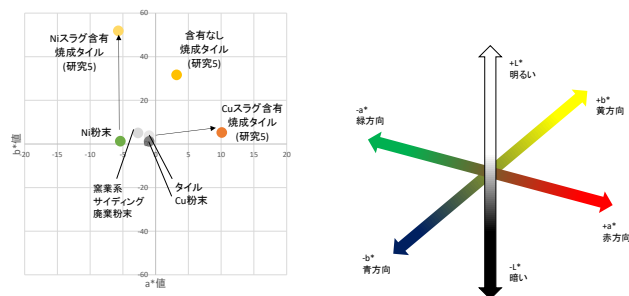
a) 銅スラグ b) 廃材 W 木 (1150℃、3 時間焼成、2mm 塗厚、 $\text{Na}_2\text{CO}_3:50\%$ 、Cu10%) c) b の 3D 画像解析

写真 4 銅スラグを添加し呈色を行ったタイルガラス被膜



a) フェロニッケルスラグ b) 廃材 W 木 (1150℃、3 時間焼成、2mm 塗厚、 $\text{Na}_2\text{CO}_3:50\%$ 、Ni10%) c) b の 3D 画像解析

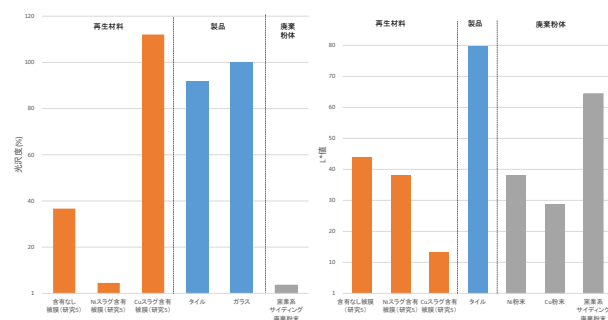
写真 5 フェロニッケルスラグを添加し呈色を行ったタイルガラス被膜



a) a^*b^* 値

b) $L^*a^*b^*$ 概念

図 7 各試験体及び製品の色差



a) 光沢度

b) L^* 値

図 8 再生ガラス質系資材テクスチャーの変化