

## 陶器微粉末により着色したコンクリートの物性と色彩に関する研究

A Study on Mechanical Properties and Color of Colored Concrete Using Earthenware Powder

井上真澄<sup>1</sup>・平尾和洋<sup>2</sup>・山本直彦<sup>3</sup>・児島孝之<sup>4</sup>

Masumi Inoue, Hirao Kazuhiro, Naohiko Yamamoto, Takayuki Kojima

<sup>1</sup>立命館大学助教 理工学部建築都市デザイン学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Asistant Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Architecture and Urban Design

<sup>2</sup>立命館大学准教授 理工学部建築都市デザイン学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Associate Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Architecture and Urban Design

<sup>3</sup>奈良女子大学准教授 生活環境部人間環境学科 (〒600-8441 奈良市北魚屋西町)

Associate Professor, Nara Women's University, Dept. of Residential Environmental and Design

<sup>4</sup>立命館大学教授 理工学部建築都市デザイン学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Architecture and Urban Design

The purpose of this study is the development of structural material with its superior strength and fire-resistance in historical city landscape. It is thought that reusing of waste colorful earthenware powder as admixture material of concrete is effective to color the concrete. In this study, the physical properties and the color evaluation of concrete using the earthenware powder were examined. As a result, the strength and coloring effect of concrete increased with the increase of the replacement ratio of the earthenware powder. The color of concrete using the earthenware powder was satisfied with the color evaluation of the walls of temples and shrines in traditional area of Kyoto.

**Key Words :** *earthenware powder, colored concrete, strength, color evaluation*

### 1. はじめに

京都に代表される歴史的な都市において、地震や火災など自然災害に対する都市防災を考える場合、土木・建築の防災構造材料として強度と耐火性に優れるコンクリートの果たす役割は非常に大きい。また、同時に既存の町並みへの調和など都市景観の保全に対して十分な配慮が要求される。一般にコンクリートは、構造材料として優れた性能を有する反面、木材や石のような天然の素材に比べて無彩色で単調なため、見る人に人工的な印象を与えやすい。この場合、周辺環境に合わせて顔料等により着色をするカラーコンクリートやコンクリートの表面処理(洗い出し、研磨など)、化粧型枠によって様々な凹凸をつけるなどの方策が有効である。

一方で、環境に対する取り組みは各業界において年々活発化しており、ゴミ処理も廃棄から分別回収によるリサイクル再資源化、粗大ゴミもリサイクル法による収集で、資源の再利用およびリサイクルが整備されつつある。陶器業界においても資源の枯渇化、逼迫する最終処理場の問題等から陶器製品のリサイクル再資源化が求められているが、陶器製品の製造過程で発生する不良品は、産業廃棄物として埋め立て処理されているのが現状である。舗装材料や陶器製品、コンクリート材料<sup>1), 2)</sup>への再利用に関する技術開発が進められているものの、そのリサイクル率は低く新たな用途の開発が望まれる。

本研究は、都市景観への調和を可能にする意匠性と構造性能を両立する防災構造材料の開発を目的としている。そこで、コンクリートに色彩を付与する方策として、陶器廃材のコンクリート用着色材への再利用に着目し、陶器廃材を微粉砕してモルタルおよびコンクリートに混入した場合の力学的特性および色彩について検討を行った。陶器類には様々な色彩を有するものがあり、微粉砕してコンクリートに混入できれば着色効果が期待される。また、資源の有効利用の観点からも陶器廃材の混和材料としての再利用に関する検討は非常に有意義と考えられる。

具体的な研究の手順としては、まず各種の色彩を有する陶器廃材の混入によるセメント系材料への着色効果を確認するため、モルタル供試体を用いて各種陶器の着色効果を確認した。次に最も着色効果の高いと判断された陶器廃材を用いてコンクリート供試体を作製し、その力学的特性、色彩、各種環境条件に暴露した場合の耐候性について検討を行った。さらに着色したコンクリートが景観素材として適用可能かを確認するため、京都東山山麓地区における景観色彩調査結果<sup>3)</sup>を色彩指標として色彩評価も行った。

## 2. 陶器微粉末と使用材料

陶器廃材は植木鉢および外装用タイルを対象とし、色彩の異なる計 4 種類を選定した。採取後陶器廃材は、ジョークラッシャ、ロールクラッシャ、ボールミルを用いて順に微粉砕した。表 1 に陶器微粉末の物性を示す。一般に着色材の粒子径は  $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$  程度であり、着色力の大きさは粒子径が小さいほど大きい<sup>4)</sup>。しかし、陶器廃材の粉砕過程において、セメントの粒度より細かくした場合、乱反射の影響により粉体の色彩が薄れる傾向にあったため、セメントの粒度を目安として粉砕を行った。図 1 に各陶器微粉末の粒度曲線を示す。粒度は、レーザ回折式粒度分布測定装置を用いて測定した。

表 1 にはモルタルおよびコンクリートの使用材料の物性も同時に示す。セメントには普通ポルトランドセメントを使用した。

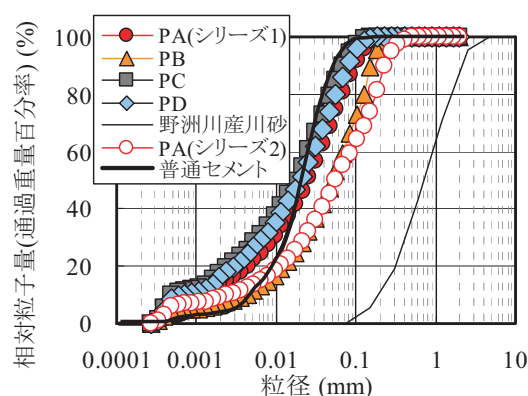






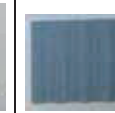



図 1 陶器微粉末の粒度曲線

表 1 使用材料

材料		主な性質			
セメント	C	普通ポルトランドセメント (密度: $3.16\text{g/cm}^3$ 、比表面積: $3260\text{cm}^2/\text{g}$ )			
陶器 微粉末	P	植木鉢 PA (密度 $2.63\text{g/cm}^3$ )	外装用タイル PB (密度 $2.55\text{g/cm}^3$ )	外装用タイル PC (密度 $2.64\text{g/cm}^3$ )	外装用タイル PD (密度 $2.52\text{g/cm}^3$ )
		 	 	 	 
		粉砕前	粉砕後	粉砕前	粉砕後
		粉砕前	粉砕後	粉砕前	粉砕後
細骨材	S	野洲川産川砂 (表乾密度: $2.60\text{g/cm}^3$ 、F.M.: 2.73、吸水率: 1.56%)			
粗骨材	G	高槻産硬質砂岩碎石 (表乾密度: $2.70\text{g/cm}^3$ 、F.M.: 6.80、吸水率: 0.70%、MS: 20mm)			
混和剤	Ad <sub>1</sub>	AE 助剤 (主成分: ポリオキシエチレンアルキルエーテル硫酸ナトリウム塩)			
	Ad <sub>2</sub>	AE 減水剤 (主成分: リグニンスルホン酸塩とポリオール複合体)			
	Ad <sub>3</sub>	AE 助剤 (主成分: アルキルアリルスルホン酸塩)			

## 3. 色彩評価方法

陶器微粉末を用いたモルタルおよびコンクリートの色彩は、接触型分光色差計を用いて  $L^*a^*b^*$  表色系、

マンセル表色系(H V/C)で表した。照明、受光方式は JIS Z 8722 の条件 b に準拠し、測定波長範囲は 400～700nm、測定波長間隔は 20nm、反射率測定範囲は 0～150%、分解能は 0.01%、測色条件は光源 D<sub>65</sub>、視野角条件 10°C、測定径 8mm である。

L\*a\*b\*表色系は、CIE(国際照明委員会)で規格化されており、日本では JIS Z 8729 に規定されている。L\*は明度指数といい、100 から 0 までの範囲の値で明るさを示し、この値が高くなるほど白、低い場合は黒となる。a\*と b\*はクロマティックネス指数(色質指数)といい、-120 から 120 の値を示す。a\*がプラスの場合は赤色、マイナスの場合は緑色に近くなる。一方、b\*がプラスの場合は黄色、マイナスの場合は青色に近い色となる。a\*と b\*の組み合わせによって色相と鮮やかさの関係を表す<sup>5)</sup>。以下に、L\*a\*b\*表色系の表記例を示す。

表記例) L\*=36.94、a\*=21.68、b\*=24.23 [茶 ]

一方、マンセル表色系は、「三属性による色の表示方法」として JIS Z 8721 で採用されており、色相(色合い)を H、明度(明るさ)を V、彩度(鮮やかさ)を C で表す。色相は 1～10 の数字と記号(赤は R、黄赤は YR、黄は Y など)で、明度を 0(完全暗黒)から 10(完全純白)の数字で、最後に彩度を 0(無彩色)から始まる数字で表す。

表記例) 5R 4/14 [鮮やかな赤 ]

#### 4. モルタルによる実験 (シリーズ 1)

##### (1) 実験要因

表 2 にシリーズ 1 の実験要因を示す。コンクリートによる試験に先立ち、表 1 に示した 4 種類の廃陶器微粉末をモルタルに細骨材置換した場合、置換率がモルタルの圧縮強度と色彩に及ぼす影響を確認した。供試体は φ50×100mm の円柱供試体とし、材齢 28 日において圧縮強度試験と色彩評価を行った。

表 2 実験および配合要因(シリーズ 1)

要因		仕様
陶器微粉末		PA、PB、PC、PD
配合要因	水セメント比[W/C]	75%
	細骨材セメント比 [(S+P)/C]	3.5
	廃陶器微粉末置換率[P/(C+P)]	0、20、30、40、50%
測定項目		圧縮強度(材齢 28 日) 色彩 (L*a*b*値、H V/C 値)

##### (2) モルタルの配合

モルタルの配合は、水セメント比[W/C]は 75%、細骨材セメント比[(S+P)/C]は 3.5 とした。全粉体質量 [C+P]に占める陶器微粉末質量[P]の割合(以下、陶器置換率[P/(C+P)])は 0～50%となるように、細骨材の内割置換率[P/(S+P)]を決定した。目標フローは 180±20mm、目標空気量は 4±1%とし、混和剤(Ad<sub>1</sub>)を用いて調整した。

##### (3) モルタル供試体の養生方法と試験方法

供試体は、打設後型枠上面をガラス板で覆い、2 日間恒温恒湿室(20±1°C、RH90±5%)中に静置し、その後脱型し材齢 28 日まで標準水中養生(20±1°C)を行った。圧縮強度は、JSCE-G 506 1999「円柱供試体を用いたモルタルまたはセメントペーストの圧縮強度試験方法」に準じて材齢 28 日で試験を行った。色彩は、脱型後恒温恒湿室(20±1°C、RH60±5%)内で材齢 28 日まで養生した供試体の型枠面に対して分光色差計により測色した。

##### (4) 実験結果および考察

###### a) 圧縮強度と陶器置換率の関係

図 3 に圧縮強度と陶器置換率の関係を示す。陶器微粉末を細骨材置換したモルタルは、置換率の増加に伴い圧縮強度が大きくなる傾向にある。これは、陶器微粉末量が増加するほど硬化体組織が緻密化すること、陶器微粉末がモルタルの練混ぜ水を吸水し見かけの水セメント比が低下することに起因すると考えられる。

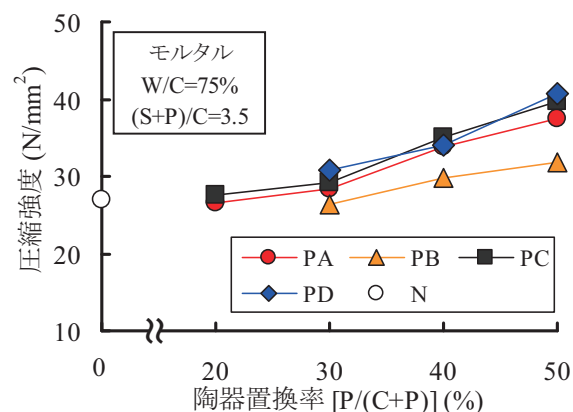


図 3 圧縮強度と陶器置換率の関係

## b) 色彩評価

図 4 に  $L^*a^*b^*$  値と陶器置換率の関係を示す。明度を表す  $L^*$  値は、廃陶器の種類によって若干の変動はあり、置換率の変化による傾向は確認できなかった。一方、色相と彩度を表す  $a^*$  値と  $b^*$  値は、赤色系の陶器微粉末 PA の場合、置換率の増加に伴い各値が明確に増加する傾向にある。一方、PA 以外の廃陶器微粉末に関しては、置換率の増加に伴う値の変化が小さく、無置換供試体と明確な差異は得られなかった。以上より、コンクリート用の着色材としては、赤色系の陶器微粉末(PA)の使用することが望ましいと判断した。

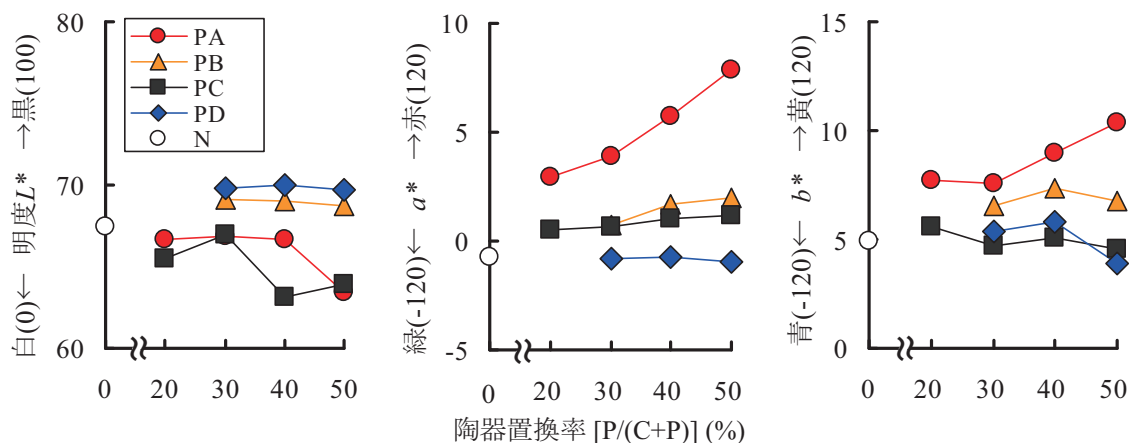


図 4  $L^*a^*b^*$  値と陶器置換率の関係

## 5. コンクリートによる実験 (シリーズ 2)

### (1) 実験要因

表 3 にシリーズ 2 の実験要因を示す。シリーズ 1 の結果より着色効果が最も高いと判断された赤色系の廃陶器微粉末 PA を細骨材置換したコンクリートを作製し、その諸特性について実験的に検討を行った。

着色したコンクリートの場合、長期間に渡って自然環境にさらされた場合の変色や色落ちに対する抵抗性を明らかにする必要がある。そこで打設後 28 日間水中養生した  $\phi 10 \times 20 \text{cm}$  供試体を各種環境条件に暴露し、供試体型枠面にて色彩の経時計測を行った。

さらに、色彩指標として東山山麓街路沿いの外壁を対象とした JIS 標準色票による色彩調査結果と着色したコンクリートの色彩を比較検討した。

表 3 実験および配合要因(シリーズ 2)

要因		仕様
配合	陶器	PA
	水セメント比 [W/C]	60%
配合	陶器置換率 [P/(C+P)]	0%、20%、30%、40%
	物性試験項目	圧縮強度、曲げ強度、割裂引張強度、静弾性係数、乾燥収縮、凍結融解抵抗性
色彩表色系		$L^*a^*b^*$ 値、マンセル値
暴露条件 (色彩評価用)		屋外、低湿屋内、高湿屋内

表 4 コンクリートの配合およびフレッシュ試験結果

P/(C+P) (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )					混和剤 ( $\text{ml}/\text{m}^3$ )		スランプ (cm)	空気量 (%)
			W	C	P	S	G	Ad <sub>2</sub>	Ad <sub>3</sub>		
0	60	48	174	290	0	880	974	580	870	6.0	3.6
20		72			753	1012	1088	1451	6.0	3.7	
30		125			666	1050	1443	2071	8.0	4.7	
40		194			562	1088	1934	2901	7.0	2.1	

## (2) コンクリートの配合

表4にコンクリートの配合とフレッシュ試験結果を示す。配合は、水セメント比[W/C]が60%、陶器置換率[P/(C+P)]が0~40%として決定した。目標スランブは $8 \pm 2\text{cm}$ 、目標空気量は $4 \pm 1\%$ とし、細骨材率と混和剤量でフレッシュ性状を管理した。

## (3) 供試体の養生方法と試験方法

陶器微粉末を細骨材置換したコンクリートの諸特性を明らかにするため、JIS の試験方法に準拠し、スランブ、空気量、圧縮強度、曲げ強度、割裂引張強度、静弾性係数、乾燥収縮、凍結融解抵抗性の測定を行った。

着色したコンクリートの耐候性は、打設後 28 日間水中養生した  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  供試体を各種環境条件に暴露し、供試体型枠面にて色彩の経時計測を行った。暴露条件は、屋外環境、低湿屋内環境( $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、 $60 \pm 5\%RH$ )、高湿屋内環境( $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、 $90 \pm 5\%RH$ )の 3 水準とした。

色彩指標として東山山麓街路沿いの外壁(土壁、モルタル壁、木材壁、コンクリート壁など景観素材)を対象とした JIS 標準色票(JIS Z 8721 準拠、光沢版)による色彩調査結果をマンセル色度図にプロットし、着色したコンクリートとの比較検討を行った。

## (4) 実験結果および考察

### a) フレッシュ性状

フレッシュ試験の結果(表 4 参照)、置換率 40%の空気量を除き、陶器微粉末を細骨材置換したコンクリートのスランブおよび空気量は、混和剤と細骨材率の調整により、目標の許容値を満足した。一方、置換率 40%では、目標のスランブは得られたものの空気量は目標値を若干下回った。また、他の置換率に比べ粘性が高く型枠への打込みや締固めなどのワーカビリティが若干低下した。従って、置換率が大きくなる場合は、極端にワーカビリティが低下することが予想されることから、混和剤の種類と使用量、単位水量等の決定に十分な配慮が必要になると考えられる。

### b) 力学的特性

図 5 に各種強度、静弾性係数と陶器置換率の関係を示す。圧縮強度は、モルタルによる実験と同様に陶器置換率の増加に伴い大きくなる傾向にあり、材齢 28 日における置換率 40%供試体では、無置換に比べ 25%の強度増加が確認された。一方、引張強度、曲げ強度および静弾性係数については、置換による影響が明確ではないが、一部を除けば無置換の場合と同等以上の値を示した。

図 6 に乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。陶器微粉末を細骨材置換した場合、無置換の普通コンクリートと大きな差異はない。また、置換率の変化に伴う乾燥収縮の明確な傾向は確認できなかった。

図 7 に凍結融解試験における相対動弾性係数の経時変化を示す。相対動弾性係数は、置換率が大きい方がサイクルの経過に伴い低下する傾向は示すものの、サイクル終了時の耐久性指数は 90 以上を示した。従って、陶器微粉末を用いたコンクリートは、普通コンクリートと同程度の耐凍害性を有すると考えられる。

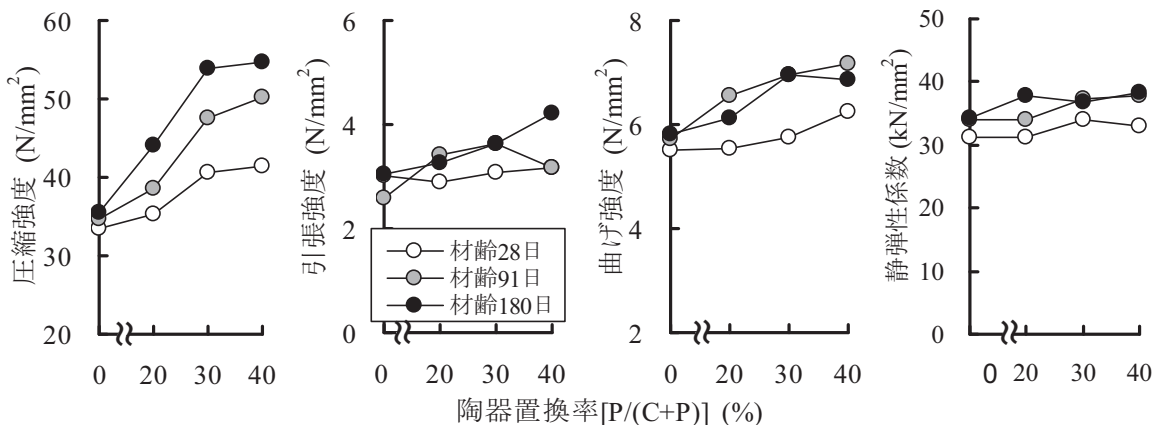


図5 各種強度および静弾性係数と陶器置換率の関係

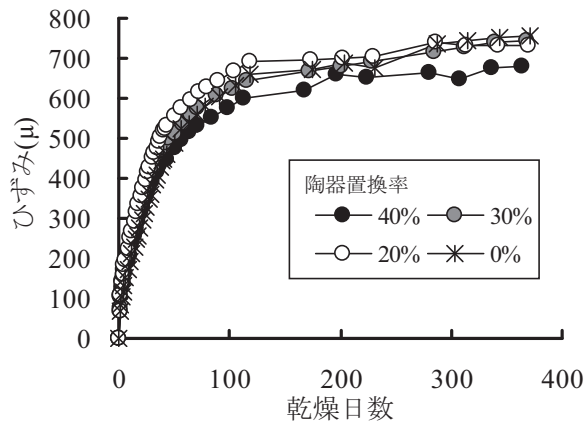


図6 乾燥収縮ひずみの経時変化

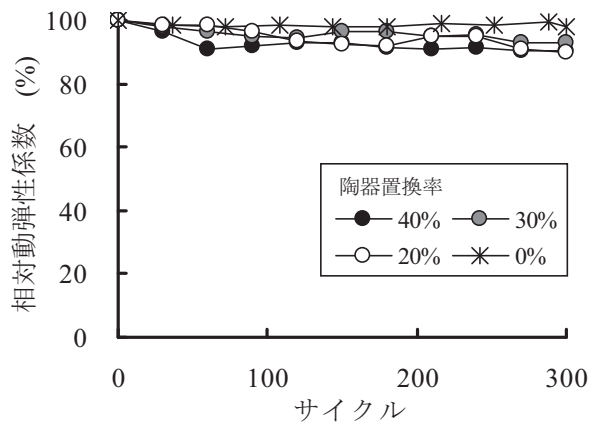


図7 凍結融解抵抗性

c) 陶器による着色効果

図8にコンクリート供試体の外観写真を、図9に暴露1ヶ月と3ヶ月の時点における  $L^*a^*b^*$  値と陶器置換率の関係を示す。暴露環境や暴露日数に関わらず置換率の増加に伴い、 $L^*$  値は小さくなる傾向に、また  $a^*$  値と  $b^*$  値は大きくなる傾向にある。陶器微粉末のみの色彩値は  $L^*=52.5$ 、 $a^*=23.5$ 、 $b^*=25.0$  であり、置換率の増加によりコンクリートの色彩値が陶器微粉末の色に近づく傾向にあることが確認できた。また、置換率 40% までの範囲では、各値は置換率の増加に伴いほぼ線形的に変化しており、さらに置換率を増加することで高い着色効果が得られるものと推察される。

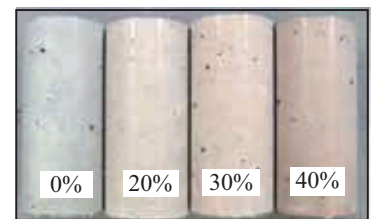


図8 供試体外観写真

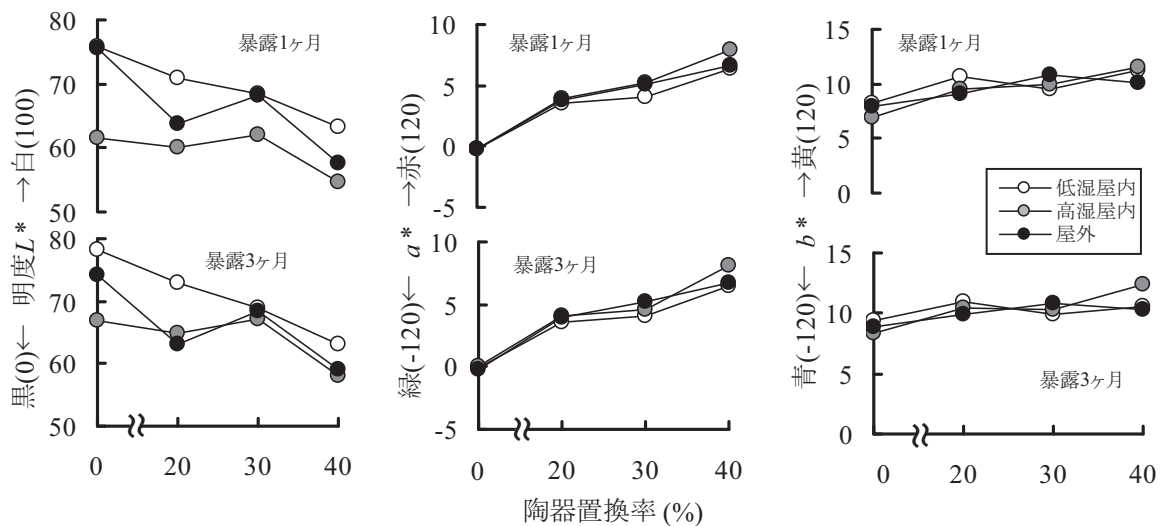


図9  $L^*a^*b^*$  値と陶器置換率の関係

d) 耐候性

図10に各種環境に暴露した供試体の色彩値の経時変化を示す。色の明るさを示す  $L^*$  値は、置換率に関わらず低湿屋内で最も変化量と値が大きい。これは、供試体表面の色彩が水分逸散に伴い淡白色になるためであり、湿度が最も低い低湿屋内で値が最も大きくなったと考えられる。屋外では、測定日前の天候状態、特に降雨の影響で供試体の含水状態が変化するため  $L^*$  値の経時変化も変動が大きくなった。

一方、 $a^*$  値と  $b^*$  値については、暴露初期において幾分変化はあるものの、それ以後は屋外と屋内の経時変化を比較しても差異は小さく、ほぼ一定で推移している。従って、暴露開始して約4ヶ月が経過した現時点においては、陶器によって着色したコンクリートは耐候性を有していると判断できる。

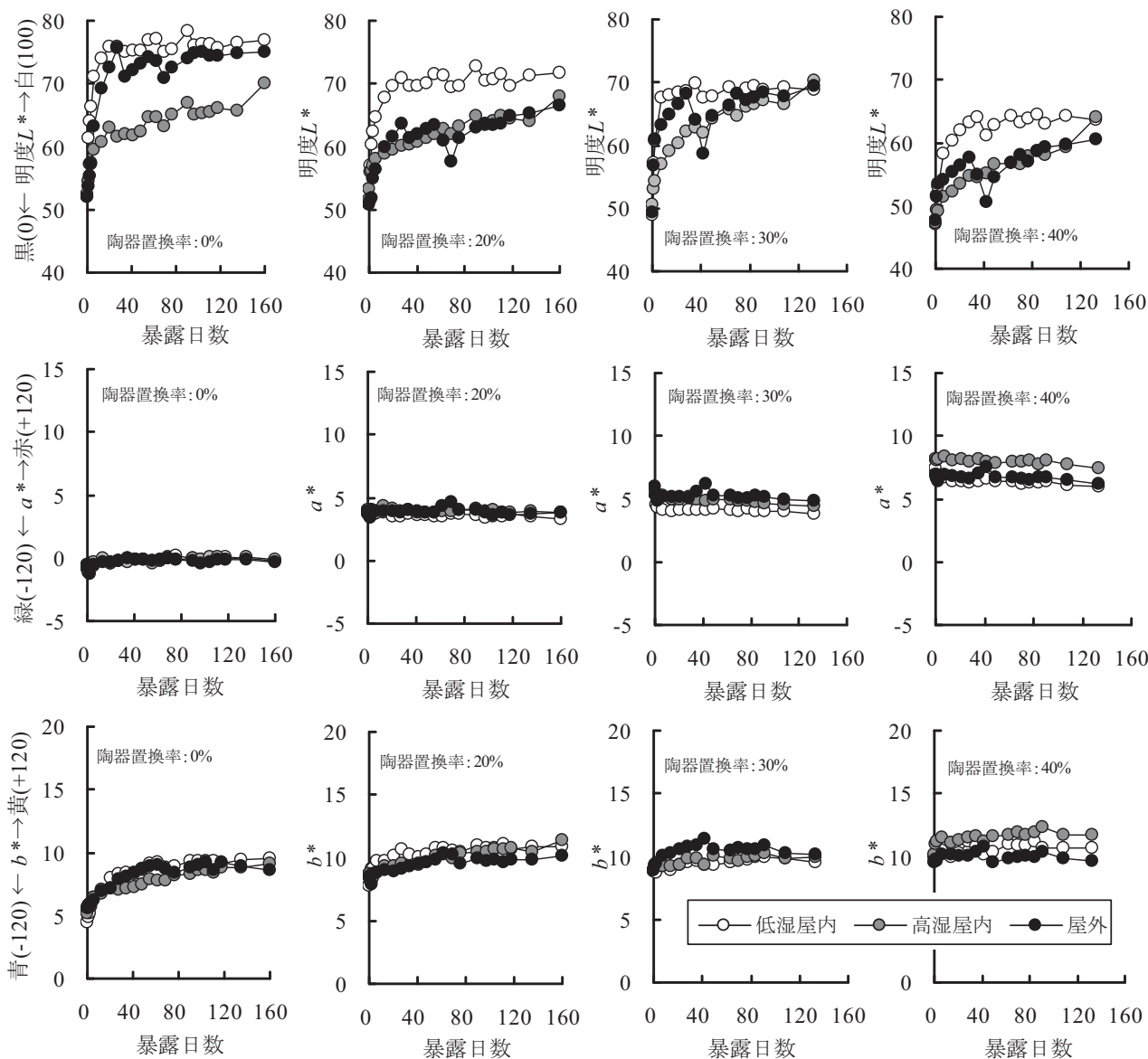


図 10  $L^*a^*b^*$ 値の経時変化

### e) 色彩評価

図 11 に京都東山山麓地区の色彩調査結果をプロットしたマンセル色度図を、図 12 にはそのカラーチャートを示す。陶器微粉末で着色したコンクリートは、マンセル表色系で色相が 5YR から 10YR、明度が 5 から 7、彩度が 1 から 2 の範囲に分布した(図中の 2 重線枠内)。この範囲は、景観色彩調査結果のプロット点が比較的集中している範囲内に位置しており、陶器微粉末で着色したコンクリートは京都東山山麓地区の色彩に適合する景観素材として適用の可能性があると考えられる。

## 6. まとめ

本研究では、都市景観との調和を可能にする意匠性と構造性能を両立する防災構造材料の開発を目的に、廃陶器微粉末の細骨材置換により着色したコンクリートの物性と色彩について実験検討を行った。以下に、本研究の範囲内で得られた主な結果をまとめる。

- 1) 赤色系の陶器微粉末によるモルタルおよびコンクリートへの着色効果が高いことを確認した。
- 2) 圧縮強度は、陶器置換率の増加に伴い、大きくなる傾向が観察された。
- 3) 陶器置換率が乾燥収縮に及ぼす影響は小さい。

- 4) 凍結融解抵抗性は置換率の増加により低下するものの、耐久性指数は90以上を示した。
- 5) 陶器置換率の増加により高い着色効果が確認され、その色彩は陶器微粉末の色に近づく傾向にあった。
- 6) 暴露4ヶ月経過した現時点においては、着色したコンクリートの色彩に変化は観察されなかった。
- 7) 廃陶器により着色したコンクリートの色彩は、京都東山山麓地区の景観色彩調査結果を満足した。

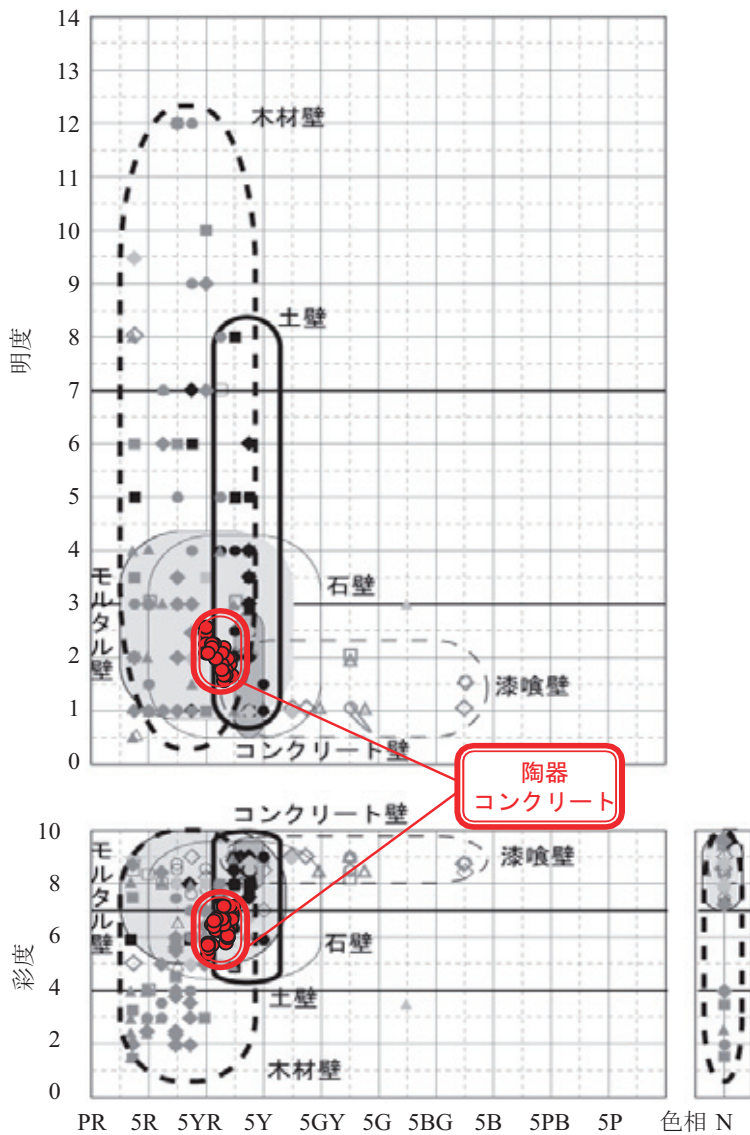


図 11 マンセル色度図

色相	2.5R	5R	10R	2.5YR	5YR	10YR	2.5Y	N
9	[Color swatches]							
8	[Color swatches]							
7	[Color swatches]							
6	[Color swatches]							
5	[Color swatches]							
4	[Color swatches]							
3	[Color swatches]							
2	[Color swatches]							
彩度	1 2 3 4	1 2 3	2 3 4 6	1 2 3 4	1 2	1 2 3 4	1 2 3 4	

図 12 カラーチャート(素材別)

今後、本研究の最終目標である意匠と構造性能を両立する材料として実構造部材やコンクリート製品への適用を想定し、さらに長期的な強度、耐候性、耐火性の検討および鉄筋コンクリート構造への適用性を検討する必要がある。

**謝辞：**本研究の遂行にあたり、滋賀県工業技術開発センター信楽窯業技術試験場のご協力を頂きました。ここに記して、厚く感謝の意を表します。

**参考文献**

- 1) 杉山 雅：タイル破砕物を混入したコンクリートの強度・耐凍害性に関する一実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1081-1082，2000.
- 2) 飛田浩孝・上原 匠・梅原秀哲・友竹博一：瓦廃材のコンクリート用骨材への適用性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1577-1582，2006.
- 3) 川崎敏弘・加藤光彦・平尾和洋・山本直彦：京都東山山麓伝統的地区における地域色と直立壁面材料の視覚的テクスチャーの定量化，日本建築学会近畿支部研究報告集，第44号・計画系，pp.461-464，2004.
- 4) (社)日本材料学会編：コンクリート混和材料ハンドブック，エヌ・ティー・エス，2004.
- 5) (財)日本色彩研究所：色彩管理と色差計の活用，日本電色工業，2001.