

# 複数の混和材と少量のセメントを用いた低炭素型セメント硬化体の性能予測

## PERFORMANCE PREDICTION OF LOW-CARBON CEMENTITIOUS COMPOSITES INCORPORATING MULTIPLE SUPPLEMENTARY CEMENTITIOUS MATERIALS AND A SMALL AMOUNT OF CEMENT

小林 知大  
Chihiro KOBAYASHI

This study focused on low-carbon mortars using multiple supplementary cementitious materials (SCMs) combined with a small amount of cement, investigating the effects of SCMs ratios on mechanical and durability performance. Specimens containing ground granulated blast-furnace slag (GGBS), fly ash, and silica fume were evaluated for compressive strength, carbonation depth, chloride ion penetration, and CO<sub>2</sub> emissions. The results indicated that GGBS-dominant blends with multiple SCMs can ensure mechanical performance while significantly reducing CO<sub>2</sub> emissions. Carbonation resistance decreased depending on the alkali content in the binder, whereas chloride resistance improved with combined supplementary materials. XGBoost-based performance prediction accurately estimated outcomes and quantitatively assessed factors required for performance improvement.

**Keywords :** *Low-carbon mortar, SCMs, GGBFS, Durability, Performance Prediction*

低炭素型モルタル, 産業副産物, 高炉スラグ微粉末, 耐久性, 性能予測

### 1. はじめに

地球温暖化をはじめとする気候変動問題への対応として、温室効果ガス排出量の削減は国際社会における重要な課題となっている。建設分野は資材製造から施工、維持管理に至るまで多量のエネルギーを消費する産業であり、中でもコンクリートの主原料であるセメントの製造過程では、石灰石の脱炭酸反応および高温焼成に起因して多量の二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) が排出される。このため、コンクリートの低炭素化、特にセメント使用量の削減は、建設分野における CO<sub>2</sub> 排出量削減の観点から重要である。

近年では、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、シリカフェームなどの産業副産物を活用し、セメント使用量を低減した低炭素型コンクリートに関する研究が数多く報告されている<sup>1)</sup>。また、複数の混和材を適切に組み合わせることで、塩化物イオン浸透抵抗性が向上するなどの相乗効果も確認されている<sup>2)</sup>。一方で、セメント使用量を大幅に削減した系では、中性化の進行や凍結融解抵抗性など、耐久性能に関する課題が指摘されており、低炭素化と長期耐久性を両立させるための調合設計が求められている<sup>3)</sup>。また、少量のセメントと複数の混和材を併用する低炭素型コンクリートでは、混和材の種類や比率が材料性能に及ぼす影響が複雑であり、力学・耐久性への寄与について体系的な整理は十分とは言えない<sup>4)</sup>。

さらに、産業副産物であるこれらの混和材の供給量は、産業構造

やエネルギー政策により将来変化することが予想される。したがって、特定の材料に依存せず、新しい材料や調合にも柔軟に対応可能な材料開発手法が求められている。

そこで本研究では、セメント置換率および混和材比率を変化させたモルタルを対象として、材料性能を体系的に評価するとともに、機械学習を用いた性能予測を試みた。具体的には、圧縮強度等の力学性能に加え、中性化深さおよび塩化物イオン浸透深さによる耐久性性能、さらに CO<sub>2</sub> 排出量に基づく環境性能を評価する。さらに、得られたデータを用いた機械学習により性能予測を行うことで、混和材比率等の調合因子が性能に及ぼす寄与度の定量化、および材料探索の効率化に対する有効性の検証を目的とする。

### 2. 実験概要

#### 2.1 使用材料および調合

本研究で使用した材料を表-1 に、結合材の主な化学組成を表-2 に示す。結合材として普通ポルトランドセメント (C)、高炉スラグ微粉末 (GGBS)、フライアッシュ (FA)、およびシリカフェーム (SF) を使用した。細骨材には 6 号珪砂 (S) を利用し、混和剤には高性能減水剤 (SP) を使用した。用いたモルタルの調合を表-3 に示す。水結合材比は、予備実験にて C5 シリーズでも標準供用期間での設計基準強度である 24 N/mm<sup>2</sup> を達成可能かつ、高性能減水剤を不使用または最小限の使用で流動性が確保可能であった 35% とし

表-1 使用材料の諸元とCO<sub>2</sub>排出量原単位

	備考	CO <sub>2</sub> 排出量原単位[kg/t]
C	普通ポルトランドセメント, 密度 3.16 g/cm <sup>3</sup>	766.6
GGBS	高炉スラグ微粉末 (石膏添加品) 密度 2.91 g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 4090 cm <sup>2</sup> /g	26.5
FA	フライアッシュII種, 能代産, 密度 2.26 g/cm <sup>3</sup> 比表面積 4460 cm <sup>2</sup> /g	19.6
SF	密度 2.20 g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 200000 cm <sup>2</sup> /g	19.6
S	6号珪砂, 密度 2.61 g/cm <sup>3</sup> , 平均粒径 0.212 mm	3.7
W	ろ過処理水道水	0.239
SP	ポリカルボン酸系高性能減水剤 密度 1.05 g/cm <sup>3</sup>	350

表-2 結合材の主な化学組成

化学組成 [mass %]	C	GGBS	FA	SF
CaO	63.6	45.21	5.12	0.51
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.66	13.19	24.44	0.59
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.15	-	8.36	0.23
SiO <sub>2</sub>	20.4	33.66	55.63	96.71
MgO	0.93	5.29	1.08	0.34
SO <sub>3</sub>	2.25	2.09	0.84	0.24
Na <sub>2</sub> O	0.23	0.23	0.81	-
K <sub>2</sub> O	0.34	0.24	1.68	1.37
強熱減量	2.48	-0.09	2.0	-

表-3 モルタル調合表 [mass. %]

調合名	Binder				S	W	SP	調合名	Binder				S	W	SP
	C	GGBS	FA	SF					C	GGBS	FA	SF			
C100-w35	100	-	-	-	100	35	0	C5G57SF38	5	57	-	38	100	35	0
C100-w55		-	-	-	200	55	0	C5G38F57		38	57	-	0		
C5G95	5	95	-	-	100	35	0	C5F57SF38	5	-	57	38	100	35	0.75
C5F95		-	95	-			0	C5G38SF57		38	-	57			3.50
C5SF95		-	-	95			6.0	C5F38SF57		-	38	57			2.50
C5G76F19		76	19	-			0	C5G57F19SF19		57	19	19			0.75
C5G76SF19		76	-	19			0.25	C5G19F57SF19		19	57	19			0.25
C5G19F76		19	76	-			0	C5G19F19SF57		19	19	57			0
C5F76SF19		-	76	19			0.25	C5G38F38SF19		38	38	19			0
C5G19SF76		19	-	76			4.0	C5G38F19SF38		38	19	38			0.75
C5F19SF76		-	19	76			5.0	C5G19F19SF38		19	38	38			0.75
C5G57F38		57	38	-			0								

た。結合材中のセメントおよび混和材の比率をパラメータとした。C100-w35を基準とし、セメントの95%を混和材で置換したシリーズ(以下、C5シリーズ)を用意した。性能比較用として、C5シリーズと同程度の圧縮強度を有するC100-w55も作製した。練混ぜには、容量5Lのオムニミキサーを用いた。結合材および細骨材を1分間空練りした後、水と高性能減水剤を加えて、さらに2分間練混ぜた。モルタルフローが150mm以上を目標とし、高性能減水剤の使用量を調整した。試験体は直径50mm、高さ100mmの円柱試験体を使用した。打込みは、型枠に2層に分けて詰め、締め固めた。打込み後1日で脱型し、20℃水中にて標準養生を行った。

## 2.2 実験方法

### (1) 圧縮強度

JISA 1108を参考に、材齢7日と28日における圧縮強度を測定した。試験機は油圧式万能試験機(東京試験機社製、最大容量:1000kN)を使用し、載荷速度は毎秒0.6N/mm<sup>2</sup>とした。

### (2) 中性化深さ

JISA 1152を参考に中性化深さを測定した。試験体は打設後28日間水中で養生した後、気温20℃、湿度60%、CO<sub>2</sub>濃度が約500ppmに管理された部屋に静置した。静置期間14日および28日で試験体を割裂し、フェノールフタレイン溶液(濃度1%)を噴霧した。試験体表面から、呈色領域までの距離を0.5mm単位で測定した。10mm

間隔で深さを測定し、平均値から中性化深さを算出した。

### (3) 塩化物イオン浸透深さ

NDIS 3437を参考に硝酸銀噴霧法による塩化物イオン浸透深さを測定した。28日間水中養生したモルタル円柱試験体を使用した。塩化物イオンの浸透方向を一方向に限定するため、オープン乾燥(60℃, 24時間)した後、円柱底面を除いてエポキシプライマーとシリコンシーラントを順次塗布した。塗膜処理後、塩化物イオンを浸透させるため、塩水浸漬(3%食塩水, 4日間)とオープン乾燥(60℃, 3日間)による乾湿繰り返しを実施した。合計4サイクル(28日間)の乾湿繰り返し後、割裂し、硝酸銀溶液(濃度:0.1mol/L)を割裂面全体に均一に噴霧した。一定量以上の塩化物イオンが存在する領域では白色に呈色する。噴霧後30分間静置した後、曝露面から呈色境界までの距離を0.5mm単位、5mm間隔で測定し、平均から塩化物イオン浸透深さを算出した。

### (4) CO<sub>2</sub>排出量

作製したモルタルの環境影響を評価するために、原材料由来のCO<sub>2</sub>排出量を算出した。表-1にインベントリデータから得られる各材料のCO<sub>2</sub>排出量原単位を示す<sup>5)</sup>。調合から定まる使用材料の単位質量に、それぞれのCO<sub>2</sub>排出原単位を乗じたものの総和を求めることで、1m<sup>3</sup>あたりのCO<sub>2</sub>排出量を算出した。

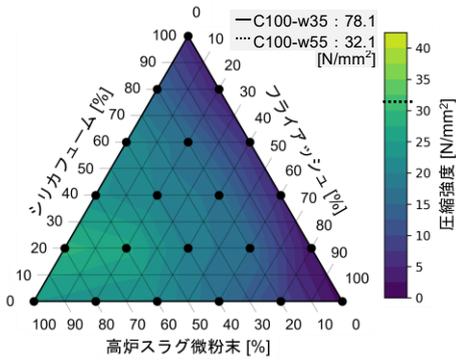


図-1 7日圧縮強度

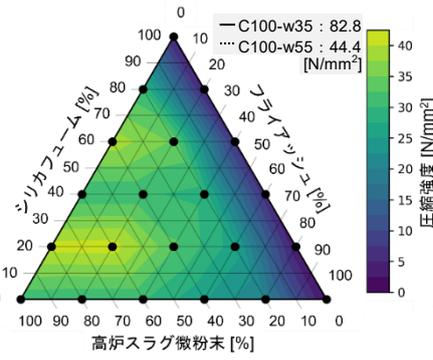


図-2 28日圧縮強度

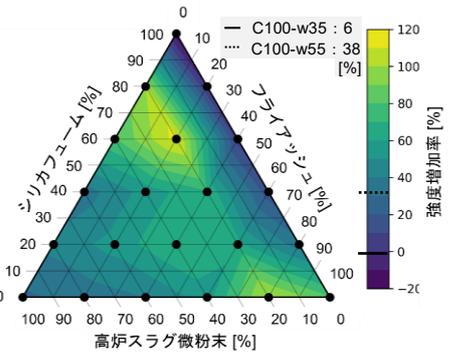


図-3 材齢7日から28日の強度増加率

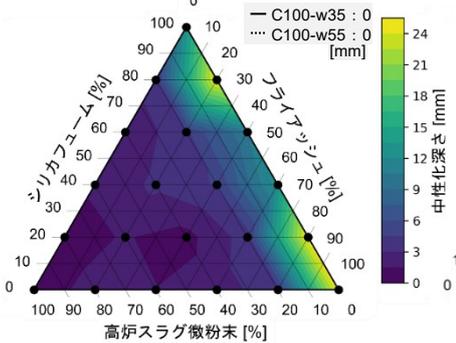


図-4 中性化深さ(暴露14日)

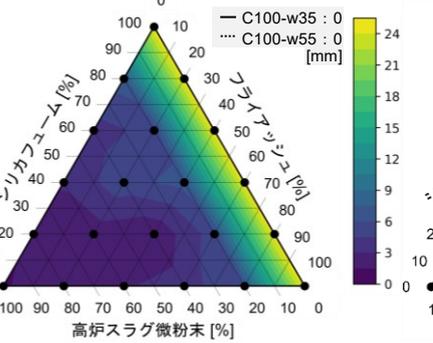


図-5 中性化深さ(暴露28日)

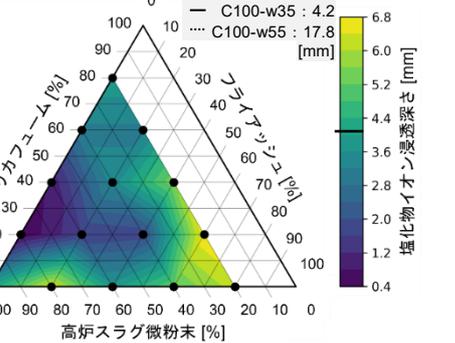


図-7 塩化物イオン浸透深さ

### (5) 機械学習を用いた性能予測

データ駆動型の材料開発の基礎的検討として、調査データから性能を予測するため、比較的小規模のデータに適しており、セメント系材料でも実績のある XGBoost を用いた性能予測を実施した<sup>6)</sup>。評価には RMSE および  $R^2$  値を使用した。さらに SHAP (SHapley Additive exPlanations) による特徴量寄与度の解析を行い、各説明変数が予測値に与える正負の影響およびその大きさを定量的に評価した。

### 3. 結果および考察

本研究では、試験結果が複雑であることから、三角グラフを用いた試験結果の分析を行った。セメントを除いた混和材の合計を 100% としたときの各混和材の比率を軸とし、図中の黒点が試験した調査の座標を意味している。グラフ右上およびカラーバーに、基準である C100 シリーズの結果を記載している。

#### 3.1 圧縮強度

材齢 7 日および材齢 28 日における圧縮強度を図-1 と図-2 に示す。基準となる C100-w35 と比較して、強度は低下したが、特に高炉スラグを多く含む場合に強度が高くなった。材齢 7 日では C5G76SF19 で 28.8 N/mm<sup>2</sup> と最も高い結果となった。表乾密度が大きく、開気孔率が小さいという結果からも、高炉スラグの潜在水硬性やシリカフェームによる組織の緻密化が強度発現に寄与していると考えられる。一方で、高炉スラグの割合が混和材中で 20% を下回ると強度は大きく低下した。材齢 28 日では、高炉スラグに加えてフライアッシュやシリカフェームを含む調合で強度の向上が確認され、C5G57F19SF19 で 41.4 N/mm<sup>2</sup> と強度が最も高くなった。別途実施した水和物の化学分析では、4 粉体系の硬化体で水和物の Ca/Si 比が小さくなる傾向を確認した。低 Ca/Si 比は一般に、緻密で強度向上に寄与することから、C5G57F19SF19 の強度発現につながったと考えられる。図-3 に材齢 7 日から材齢 28 日の強度増加率を示す。高

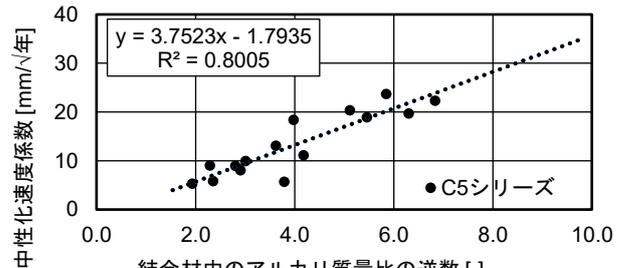


図-6 結合材中のアルカリ量と中性化速度の関係

炉スラグ単体よりもフライアッシュやシリカフェームと併用した場合に強度の増進が確認された。これらの結果から、若材齢では高炉スラグによる強度発現の影響が顕著に表れる一方で、セメントが結合材中に 5% しか含まれないような調査においても、フライアッシュやシリカフェームの水和反応による強度増進の可能性が確認された。長期材齢ではボゾラン反応によるさらなる強度向上も期待されることから、高炉スラグ単体によるセメント置換よりも、少量のシリカフェームやフライアッシュと組み合わせることで、初期強度の確保と長期強度向上が可能であると考えられる。

#### 3.2 中性化深さ

暴露期間 14 日と 28 日における中性化深さの測定結果を図-4 および図-5 に示す。セメントのみを結合材に使用した C100-w35 および C100-w55 では、中性化深さが 0 mm であったが、C5 シリーズでは、中性化の進行速度が非常に大きくなった。C5 シリーズの中では、スラグ単体を混和材とした C5G95 が最も中性化の進行が緩やかであった。一方で、シリカフェームやフライアッシュの割合が高いほど中性化深さは大きく、高炉スラグを使用しない C5F95 などでは暴露 14 日時点で試験体全体が中性化した。これらの結果は、セメント使用量およびアルカリ供給源の減少や、水和反応に起因する硬化体組織の疎密が大きく影響していると考えられる。C5F95 等では十

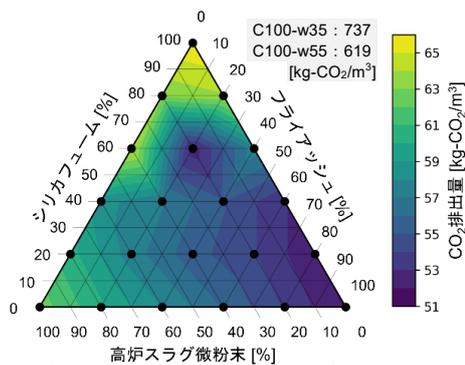


図-8 CO<sub>2</sub> 排出量 (1m<sup>3</sup>あたり)

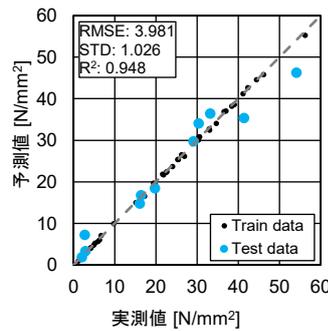


図-9 圧縮強度の予測結果

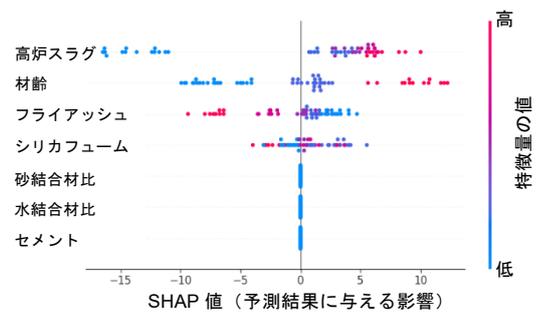


図-10 SHAP 解析による特徴量分析

分に水和反応が進行せず、粒子間の空隙が充填されなかったと推察される。ここで、結合材中の CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O をアルカリとして、結合材質量に対するアルカリ質量比を、表-2 および結合材の比率から算出した。図-6 に C5 シリーズにおける中性化速度係数と結合材中のアルカリ量との関係を示す。中性化速度係数は、中性化の進行が $\sqrt{t}$ 則に従うと仮定し、初期の中性化深さ 0 mm と、二材齢での結果から算出した。また、アルカリ量が多いほど中性化抵抗性が向上すると仮定し、横軸には結合材中のアルカリ質量比の逆数を用いた。アルカリ質量比の逆数と中性化速度係数に高い相関を示し、結合材中のアルカリ量が多いほど中性化速度係数が小さくなる傾向が確認された。C5G95 で最も小さい値を示したが、C100 シリーズでは中性化しなかったことから、C5 シリーズの中性化の進行は極めて速いといえる。したがって、非腐食環境での適用や、アルカリ供給性を持つ副産物による、アルカリ供給が有効だと考えられる。

### 3.3 塩化物イオン浸透深さ

塩化物イオン浸透深さの測定結果を図-7 に示す。C5G76SF19 で 0.4 mm と最も浸透深さが小さく、C100-w55 での 17.8 mm と比較しても非常に小さい値であった。高炉スラグとシリカフェームの組み合わせにより高い塩化物イオン浸透抵抗性が確認された。一方、主な塩化物イオンの侵入経路と考えられる開気孔率の値は C100 シリーズの方が小さいことから、塩化物イオンの侵入には細孔径分布や化学的吸着の影響が示唆される。以上より、C5 シリーズが、特に非腐食環境や海中などの環境に適している可能性が示された。

### 3.4 CO<sub>2</sub> 排出量

図-8 に算出したモルタル 1 m<sup>3</sup> あたりの CO<sub>2</sub> 排出量を示す。セメント使用量を大幅に削減し、産業副産物である高炉スラグ、フライアッシュおよびシリカフェームを混和材として使用することで、CO<sub>2</sub> 排出量が大幅に低減された。減水剤使用量の多い C5SF95 で最も高い 65.9 kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> となったものの、同程度の圧縮強度を持つ C100-w55 と比較して 89% の削減効果を確認した。

### 3.5 機械学習を用いた性能予測

図-9 に XGBoost を用いたモルタル圧縮強度の予測値と試験による実測値の比較を示す。試験用データに対する決定係数 R<sup>2</sup> が 0.948、平均的な誤差の大きさを意味する RMSE が 3.981 となり、比較的小規模のデータセットでも高い精度で予測できることを確認した。さらに、図-10 の SHAP による特徴量の寄与度解析では、特徴量の値が大きい点ほど赤く表現される。C5 シリーズの範囲では、高炉スラグの量や材齢が大きい赤い点では、SHAP 値も大きくなり、強度に最も貢献していることが確認できる。また、シリカフェームとフラ

イアッシュに関しては、ピンクで示される少量添加した場合に、SHAP 値が大きくなり強度が向上することが確認された。また、今回統一条件とした砂結合材比、水結合材比、セメント量については、結果に寄与していない特徴として SHAP 値が 0 になった。このように、SHAP による寄与解析から、性能向上に必要な要素を定量的に評価可能であることを確認した。

## 4. まとめ

少量のセメントと複数の産業副産物を使用した低炭素型モルタルについて、力学性能・耐久性能・環境性能を体系的に評価し、XGBoost による性能予測を実施した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 圧縮強度は、若材齢では高炉スラグを多く含む場合に高くなった。結合材中のセメントが極めて少ない条件においてもボゾラン反応による強度向上の可能性が示された。
- (2) 中性化は C5 シリーズで著しく進行し、特にシリカフェームやフライアッシュの割合が高いとき顕著であった。結合材中のアルカリが多いほど中性化速度係数が小さく、高い相関を示した。
- (3) 塩化物イオン浸透深さは、高炉スラグとシリカフェームを併用した調査で大きく低下し、C100 を上回る浸透抵抗性を示した。
- (4) CO<sub>2</sub> 排出量は産業副産物の使用により大幅に削減され、C5 シリーズでは C100 と比較して約 90% 以上の削減効果を確認した。
- (5) XGBoost を用いた性能予測の結果、比較的少量のデータセットでも高い予測精度を確認し、SHAP 値による特徴量の寄与度解析から性能向上に必要な要素を定量的に評価可能であった。

## 参考文献

- 1) 小林利充: 環境に配慮した低炭素型のコンクリート, コンクリート工学, Vol.54, No.5, pp.578-581, 2016.5
- 2) 真島耕平ほか: 高炉スラグ微粉末およびシリカフェームを用いたセメント系硬化体の塩分浸透抵抗性, Cement Science and Concrete Technology, Vol.66, No.1, pp.452-459, 2012
- 3) 鈴木南都ほか: 環境負荷低減に貢献する低炭素型コンクリートの力学特性と耐久性の評価 (その 2: 低炭素型コンクリートの耐久性の取得), 日本建築学会学術講演梗概集 (九州), A-1 材料施工, pp.595-596, 2025.9
- 4) Kuder K. et al.: Mechanical properties of self consolidating concrete blended with high volumes of fly ash and slag, Constr. Build. Mater., Vol.34, pp.285-295, 2012.9
- 5) 社団法人土木学会: コンクリートの環境負荷評価, コンクリート技術シリーズ, No.62, pp.39, 2004
- 6) Aslam F. et al.: Supplementary cementitious materials in blended cement concrete: Advancements in predicting compressive strength through machine learning, Mater. Today Commun., Vol.38, 107725, 2024