

発表番号：A01

# バイオ炭を混和した環境配慮型コンクリートの開発 ～コンクリートのカーボンニュートラルの実現に向けて～

清水建設(株) ○ 幸田 圭司, 山本 伸也, 久保 昌史, 田中 博一

# 発表の流れ

---

1. はじめに
2. バイオ炭による炭素貯留の考え方
3. 検討配合
4. 各種物性試験結果
5. 現場適用
6. まとめ

2050年のカーボンニュートラルの実現に向けて コンクリート分野でも低炭素化技術 が求められる

大気中のCO<sub>2</sub>を回収・吸収し、貯留・固定化した材料である 「バイオ炭」 に着目

➤ コンクリート材料としてバイオ炭を活用できないか 検討

## バイオ炭を混和したコンクリートの目標性能

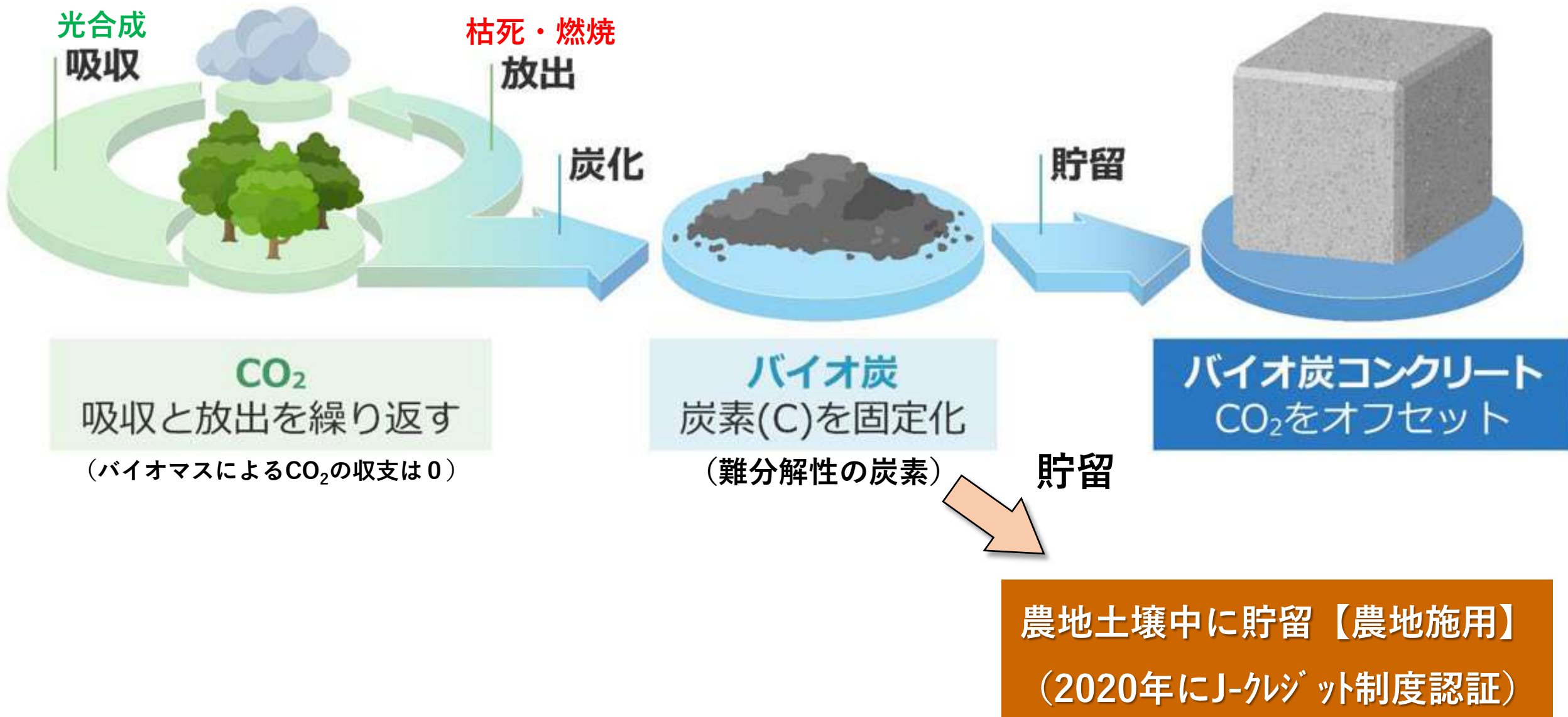
- コンクリート製造における実質的なカーボンニュートラルを実現できる こと
- 普通コンクリートと同等の性能（施工性・強度特性・耐久性）を有する こと
- 現場打ちコンクリートに適用できる汎用性を有する こと

# 発表の流れ

1. はじめに
2. **バイオ炭による炭素貯留の考え方**
3. 検討配合
4. 各種物性試験結果
5. 現場適用
6. まとめ

# バイオ炭による炭素貯留の考え方

(2/20)



## ● 本検討で使用したバイオ炭の製造フロー



## ● 本検討で使用したバイオ炭のロットごとの成分分析結果

	状態	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	平均
全水分 (%)	袋開封	14.5	16.6	16.0	13.2	18.2	18.6	17.9	16.4
固有水分 (%)	乾燥	2.0	1.6	1.3	1.6	3.0	4.2	4.2	2.6
灰分 (%)	乾燥	2.0	1.4	1.6	1.5	1.6	1.6	1.6	1.6
揮発分 (%)	乾燥	6.1	5.5	7.6	5.8	4.7	3.8	4.3	5.4
固定炭素 (%)	乾燥	89.9	91.5	89.5	91.1	90.7	90.4	89.9	90.4
実質的な炭素含有率 (%)		78.4	77.6	76.2	80.4	76.5	76.8	77.0	77.6

$$\text{実質的な炭素含有率} = \frac{\text{固定炭素}}{100 - \text{固有水分}} \times (100 - \text{全水分})$$

# バイオ炭によるCO<sub>2</sub>固定量の算定

J-クレジット制度におけるバイオ炭の農地施用にかかる方法論を基に固定量を算出。

$$\text{バイオ炭による実質的なCO}_2\text{固定量} = \text{バイオ炭によるCO}_2\text{固定量} - \text{原料収集・製造によるCO}_2\text{排出量} = \underline{\underline{2.30\text{kg-CO}_2/\text{kg}}}$$

炭素含有率 × 100年後の炭素残存率<sup>※1</sup> × 44/12

$$= 0.776 \times 0.89 \times 44/12$$

$$= 2.532 \text{ kg-CO}_2/\text{kg}$$

CO<sub>2</sub>分子量/C原子量

※1：Jクレジットの方法論より（100年後の炭素残存率）

分類	種類/原料 <sup>※1</sup>	炭素含有率	100年後の炭素残存率
インベントリ報告書 算定対象のバイオ炭	白炭	0.77	0.89
	黒炭		
	オガ炭		
	粉炭	0.80	
	竹炭	0.436（炭素含有率と炭素残存率を包含した値に対応）	

原料収集によるCO<sub>2</sub>排出量<sup>※2</sup> + 製造時によるCO<sub>2</sub>排出量<sup>※2</sup>

$$= 0.057 \text{ kg-CO}_2/\text{kg} + 0.176 \text{ kg-CO}_2/\text{kg}$$

$$= 0.233 \text{ kg-CO}_2/\text{kg}$$

※2：製造メーカーにおける実績値をもとに算出

# 発表の流れ

1. 技術の背景・目標
2. バイオ炭による炭素貯留の考え方
- 3. 検討配合**
4. 各種物性試験結果
5. 現場適用
6. まとめ



セメント 種類	配合略称	粗骨材 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )						混和剤添加量		
							W	C	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	G	ハ`付炭 (粉)	ハ`付炭 (粒)	AE減水剤 (C×wt%)	AE助剤 (A)
BB	BBベース	20	15±2.5	4.5±1.5	55	45.5	169	307	327	490	1008	0	0	1.2	3.5
	BB炭粉15					44.7	169	307	318	475	1008	15	0	1.8	15.0
BC	BCベース	20	15±2.5	4.5±1.5	50	45.5	169	338	321	481	989	0	0	1.0	3.0
	BC炭粉15					44.7	169	338	311	466	989	15	0	1.2	7.0
	BC炭粉30					43.9	169	338	301	451	989	30	0	1.4	7.0
	BC炭粒30					43.9	169	338	301	451	989	0	30	1.0	5.0
	BC炭粒60					42.3	169	338	282	422	989	0	60	1.2	7.0

- ・セメントは高炉セメントB種（BB），高炉セメントC種相当（BC）の2種
- ・バイオ炭混和量は粉状で15kg/m<sup>3</sup>，30kg/m<sup>3</sup>，粒状で30kg/m<sup>3</sup>，60kg/m<sup>3</sup>
- ・**バイオ炭は細骨材容積に置換**して使用（混和剤添加量でフレッシュ性状調整）

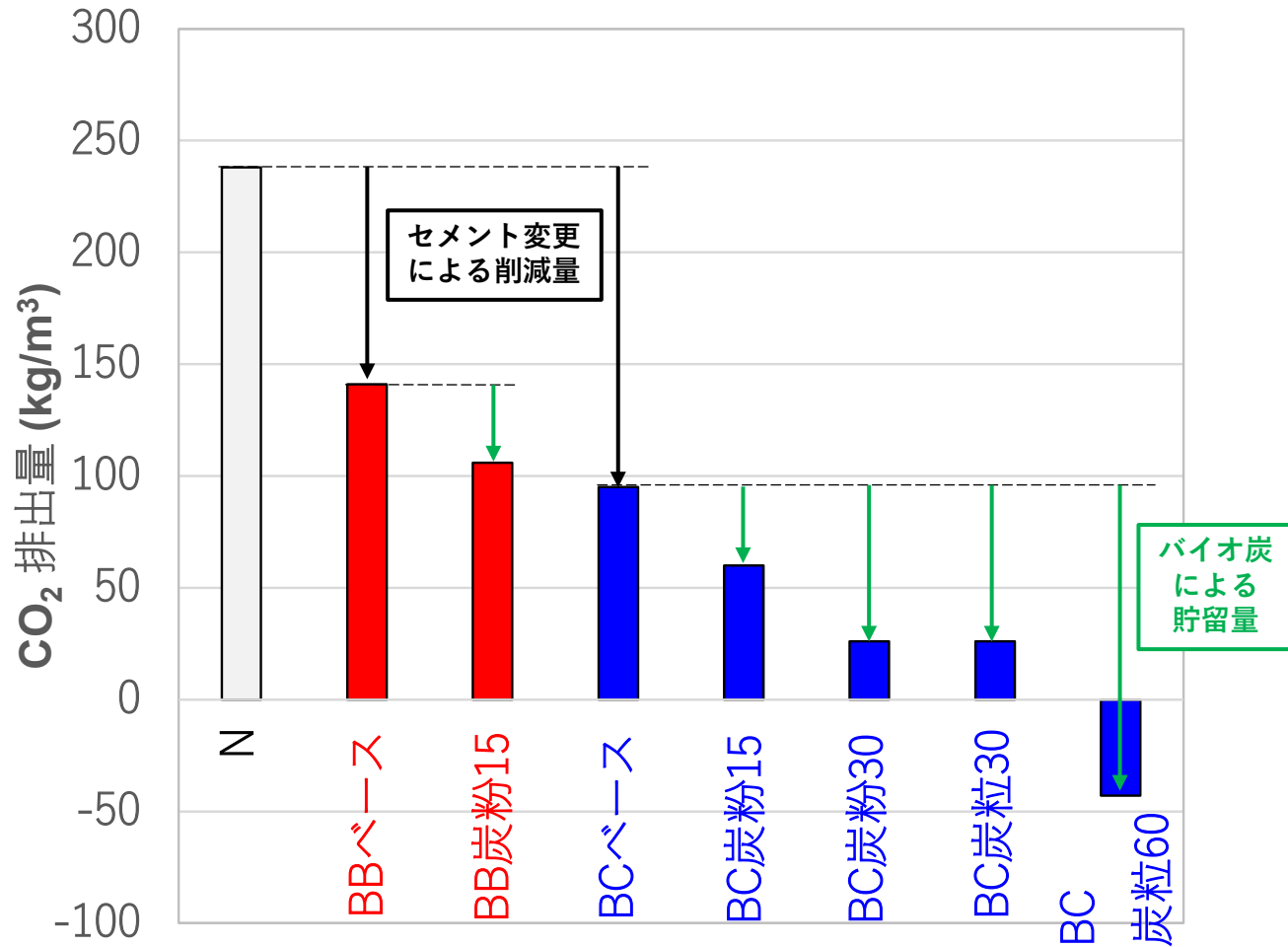
セメント 種類	配合略称	粗骨材 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )							混和剤添加量	
							W	C	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	G	ハ <sup>+</sup> 付炭 (粉)	ハ <sup>+</sup> 付炭 (粒)	AE減水剤 (C×wt%)	AE助剤 (A)
BB	BBベース	20	15±2.5	4.5±1.5	55	45.5	169	307	327	490	1008	0	0	1.2	3.5
	BB炭粉15					44.7	169	307	318	475	1008	15	0	1.8	15.0
BC	BCベース	20	15±2.5	4.5±1.5	50	45.5	169	338	321	481	989	0	0	1.0	3.0
	BC炭粉15					44.7	169	338	311	466	989	15	0	1.2	7.0
	BC炭粉30					43.9	169	338	301	451	989	30	0	1.4	7.0
	BC炭粒30					43.9	169	338	301	451	989	0	30	1.0	5.0
	BC炭粒60					42.3	169	338	282	422	989	0	60	1.2	7.0

バイオ炭混和により**所定のスランプ・空気量を確保するための混和剤の添加量は増加。**

⇒ **多孔質なバイオ炭が自由水や混和剤を吸着するため**と考えられる。

(特に比表面積の大きい粉状のバイオ炭の方がその影響が顕著である)

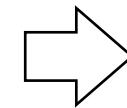
# 各配合のCO<sub>2</sub>排出量算出結果



使用材料		CO <sub>2</sub> 排出原単位 (kg-CO <sub>2</sub> /kg)
水		0.0002
セメント	N	0.7643
	BB	0.4441
	BC	0.2645
細骨材		0.0037
粗骨材		0.0029
バイオ炭		-2.299
混和剤		-

BC配合にバイオ炭を60kg/m<sup>3</sup>混和すると、

バイオ炭によるCO<sub>2</sub>貯留量 > その他の材料に起因するCO<sub>2</sub>排出量



カーボンネガティブ実現

# 発表の流れ

1. はじめに
2. バイオ炭による炭素貯留の考え方
3. 検討配合
- 4. 各種物性試験結果**
5. 現場適用
6. まとめ

## ◆ フレッシュ性状に関する試験

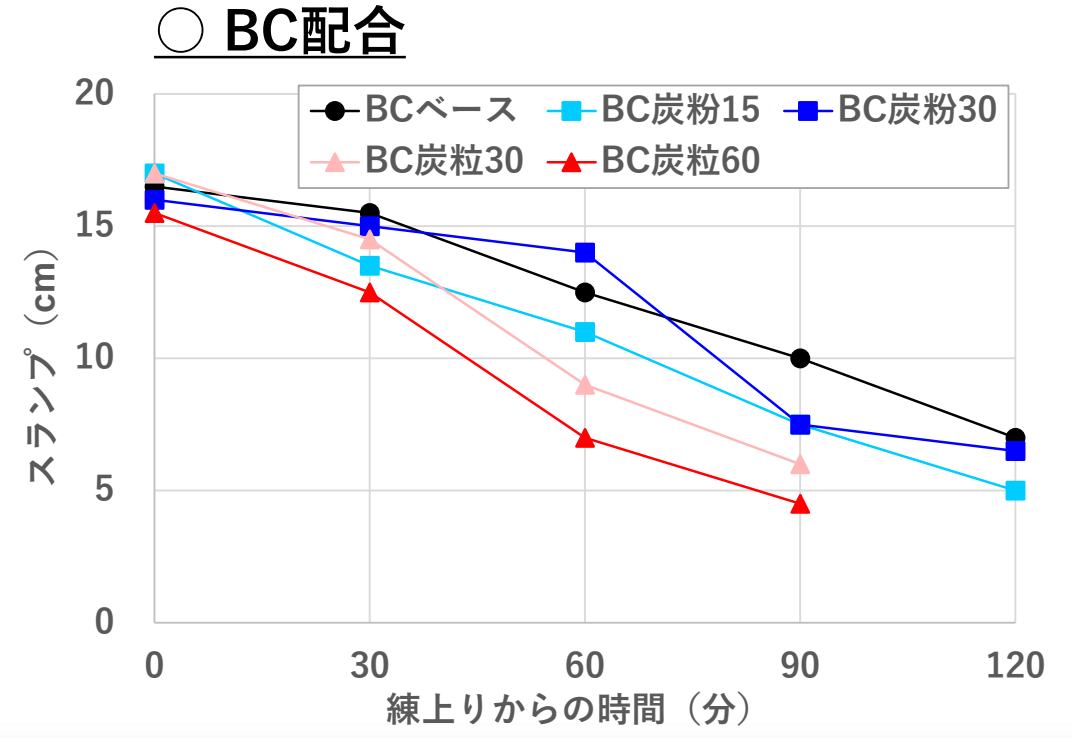
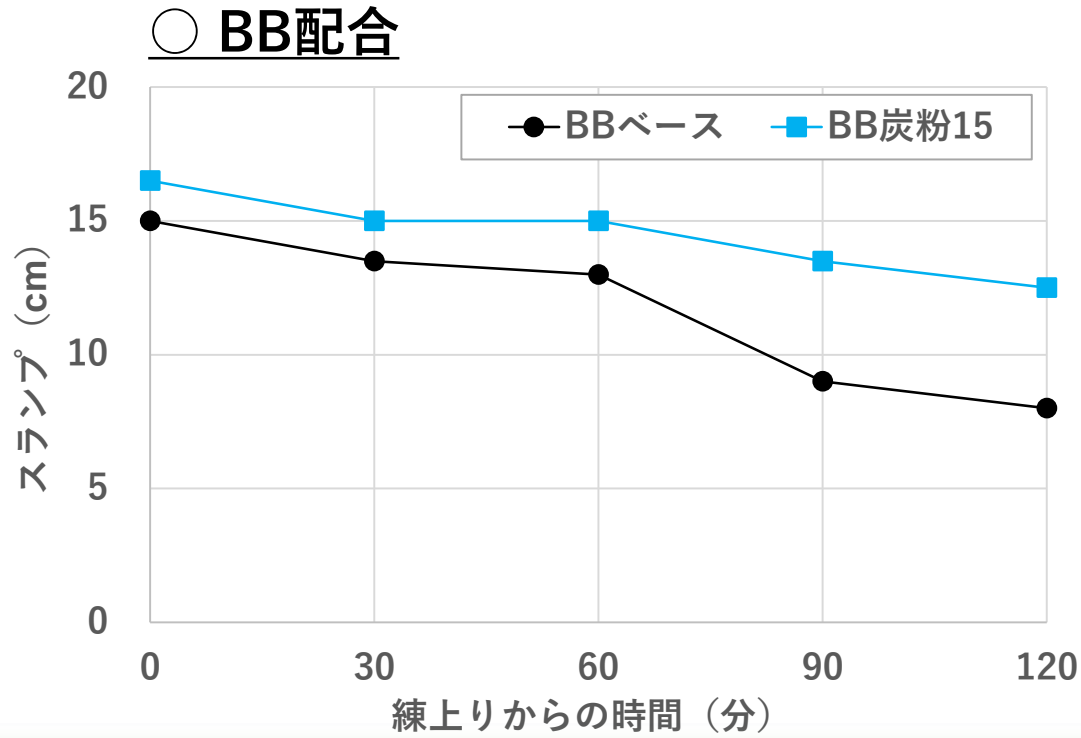
試験項目	準拠基準・内容
スランプ	JIS A 1101に準拠。経時変化（練り直・30分・60分・90分・120分）も確認。
空気量	JIS A 1128に準拠。経時変化（練り直・30分・60分・90分・120分）も確認。
ブリーディング	JIS A 1123に準拠。
加圧ブリーディング	JSCE-F-502に準拠。
圧送試験（管内圧力損失）	水平換算距離150m程度の配管を組んで試験を実施。

論文に掲載していない項目

## ◆ 硬化後の物性に関する試験

試験項目	準拠基準・内容
圧縮強度	JIS A 1108に準拠。試験材齢は7、28、91日。
促進中性化	JIS A 1153に準拠。試験材齢は7、28、56、91日。
塩化物イオン拡散係数	JSCE-G572-2018に準拠。濃度10%のNaCl水溶液に91日間浸せき後に分析。

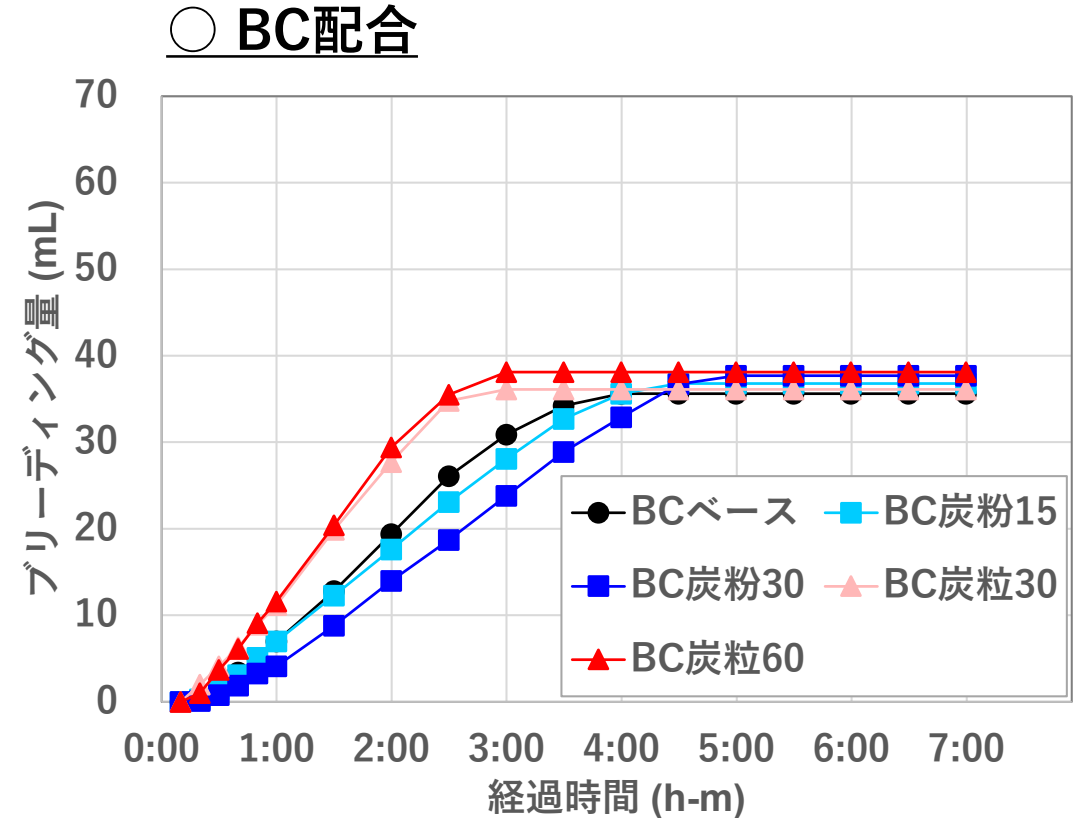
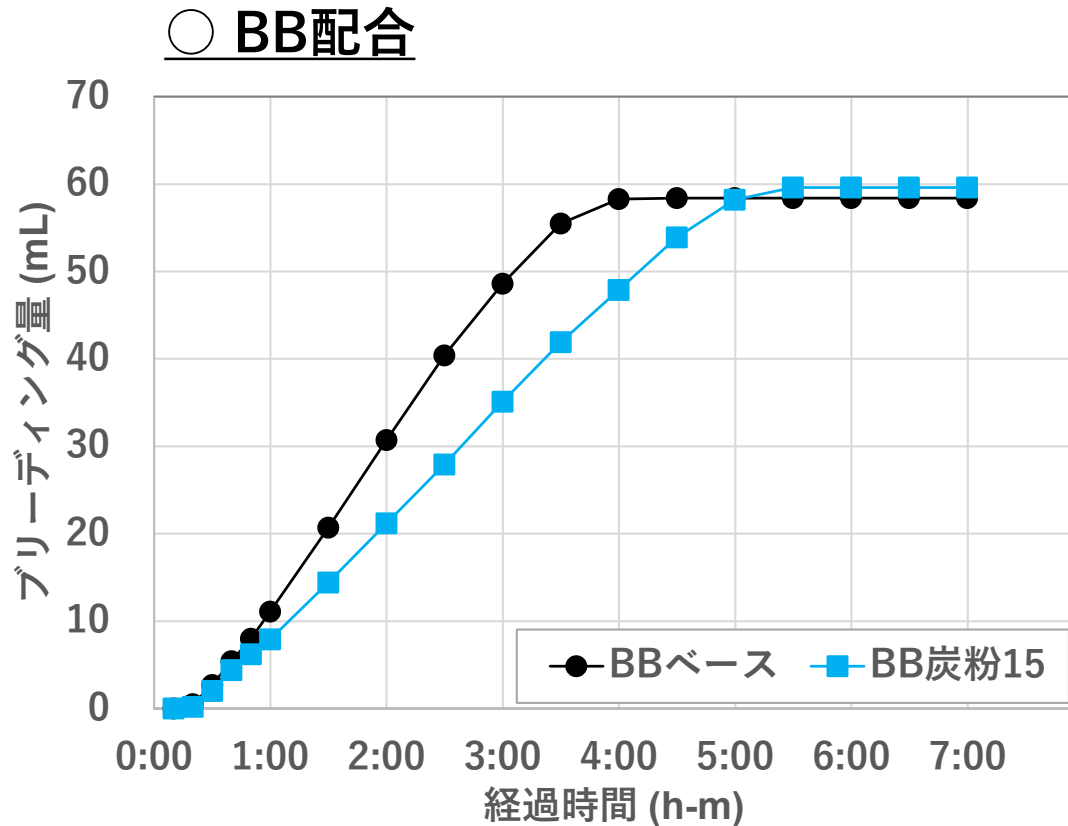
論文に掲載していない項目



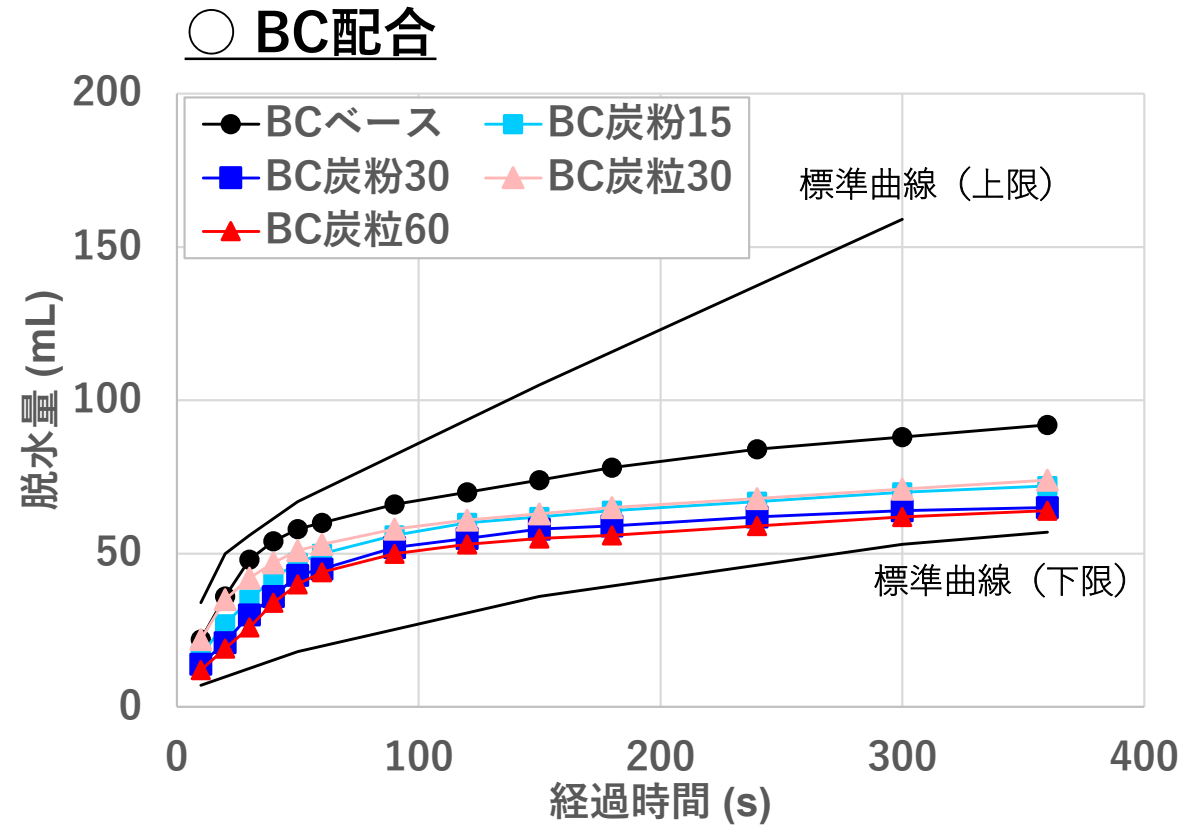
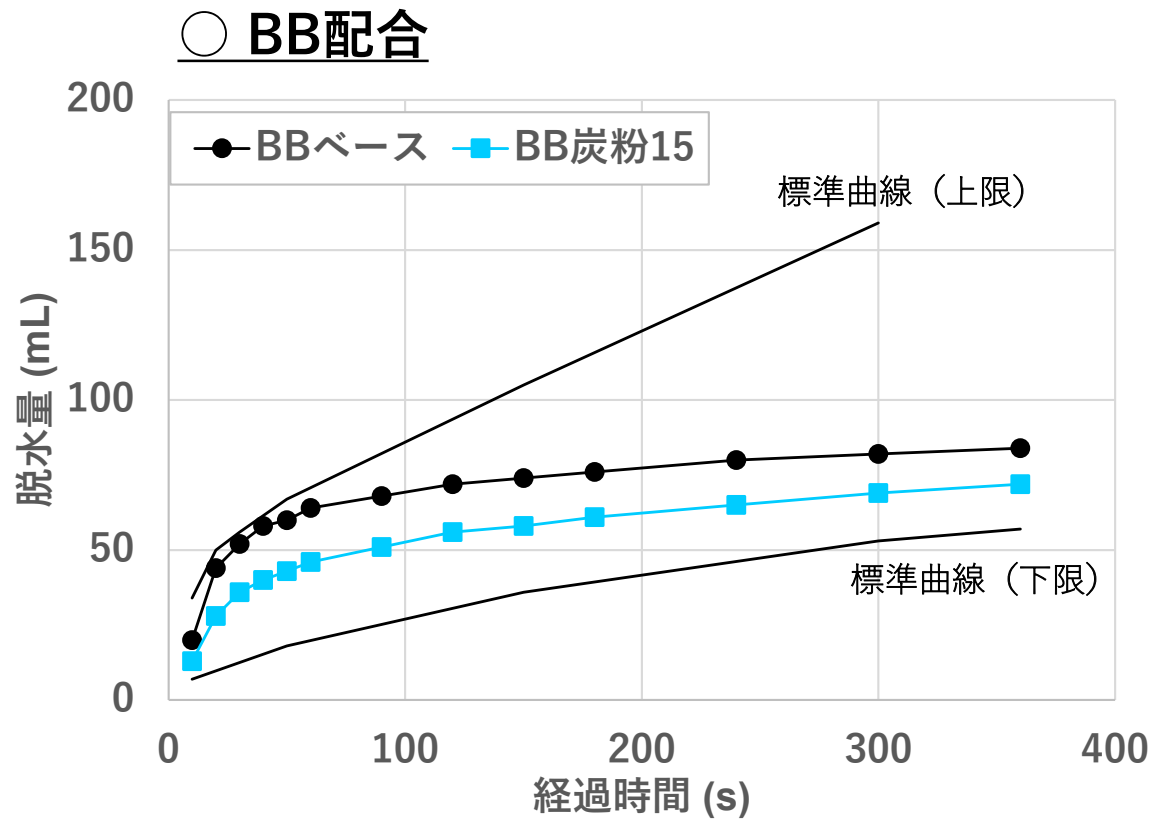
## ● バイオ炭混和によるスランプの経時保持性への影響

- ・ **バイオ炭の吸水**によるスランプロス
  - ・ **AE減水剤の添加量増加**による経時保持性の向上
- } 相反する2つの影響

➤ AE減水剤の添加量が比較的多い配合（粉状バイオ炭）はベース配合とほぼ同様の挙動だが、AE減水剤の添加量が少ない配合（粒状バイオ炭）はベース配合と比較してスランプロスが大きい傾向。



- ・ **バイオ炭混和の有無に関わらず，最終的なブリーディング量はほとんど変わらない**
- ・ ブリーディング収束までの時間が粉状のバイオ炭を混和した場合はベース配合よりも長く，粒状のバイオ炭を混和した場合は短かった。



- **すべての配合が標準曲線の範囲内に入っていた。**
- **バイオ炭を混和することにより、脱水量は少なくなる傾向（粉状＞粒状）が確認された。**  
⇒ 圧送圧が掛かることにより、多孔質なバイオ炭が自由水を吸水するためと考えられる。

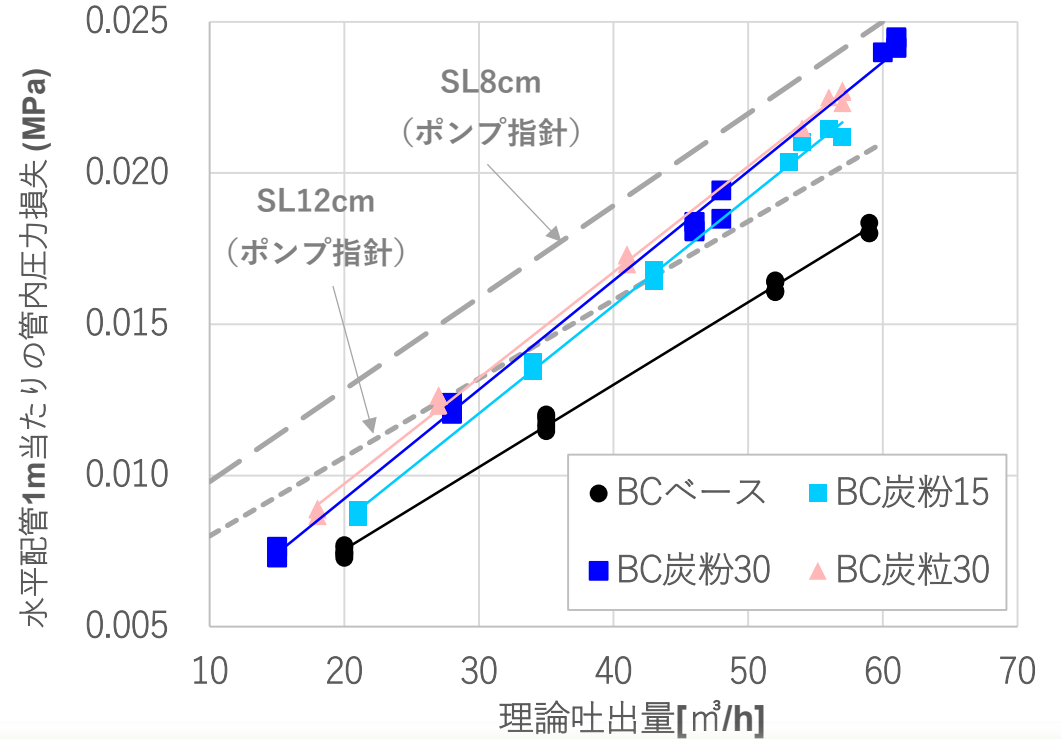




## ○ 圧送前後のフレッシュ性状試験結果

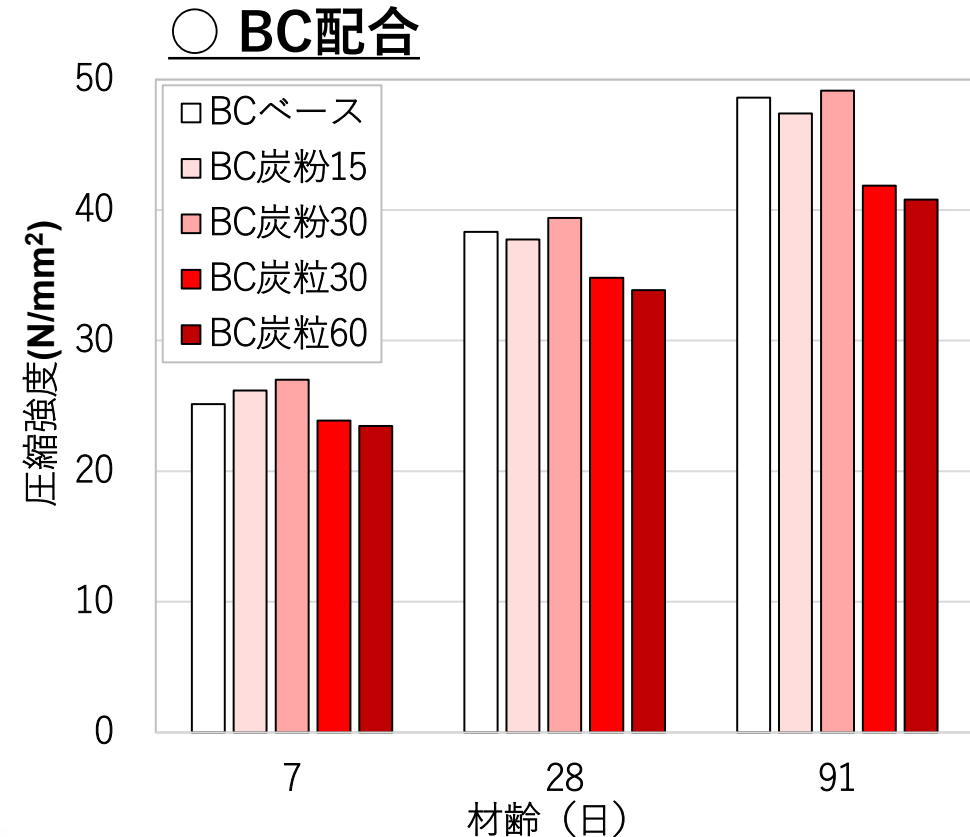
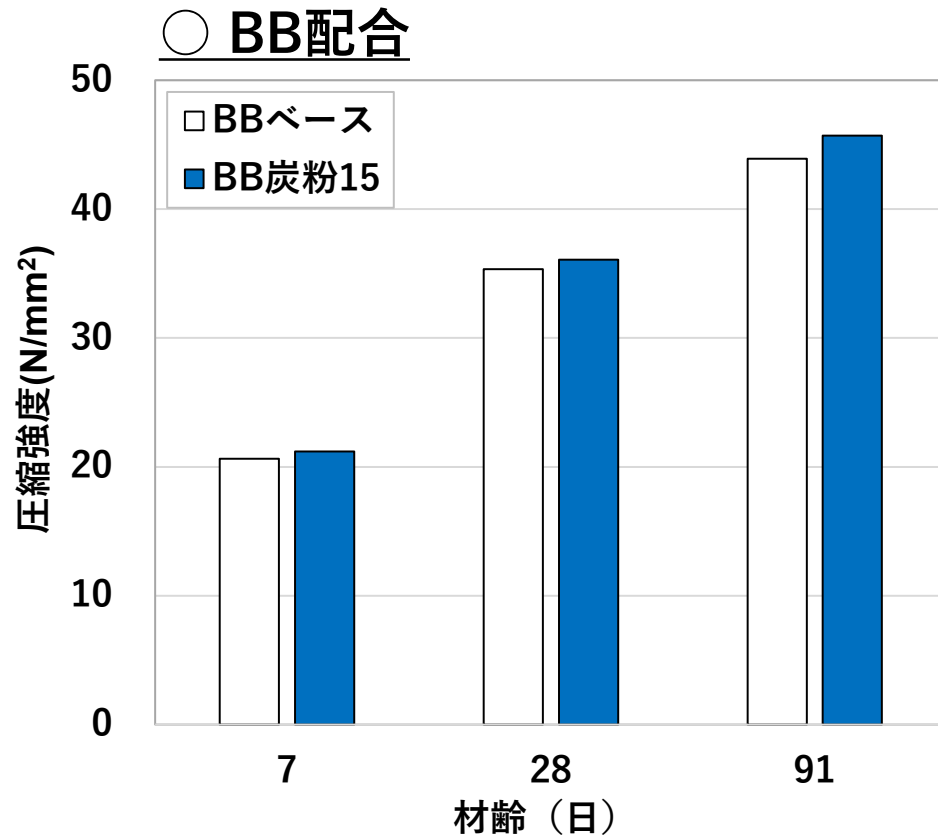
配合	状態	スランプ (cm)	空気量 (%)	Con温度 (°C)
BBベース	圧送前	15.0	5.6	21
	圧送後	13.0	5.5	24
BB炭粉15	圧送前	16.0	5.8	24
	圧送後	15.0	5.8	25
BCベース	圧送前	17.5	4.9	22
	圧送後	15.5	3.7	23
BC炭粉15	圧送前	17.0	5.2	22
	圧送後	16.5	3.6	23
BC炭粉30	圧送前	17.0	4.8	23
	圧送後	16.5	4.2	23
BC炭粒30	圧送前	15.0	5.1	22
	圧送後	13.5	3.7	23

## ○ 各配合の管内圧力損失



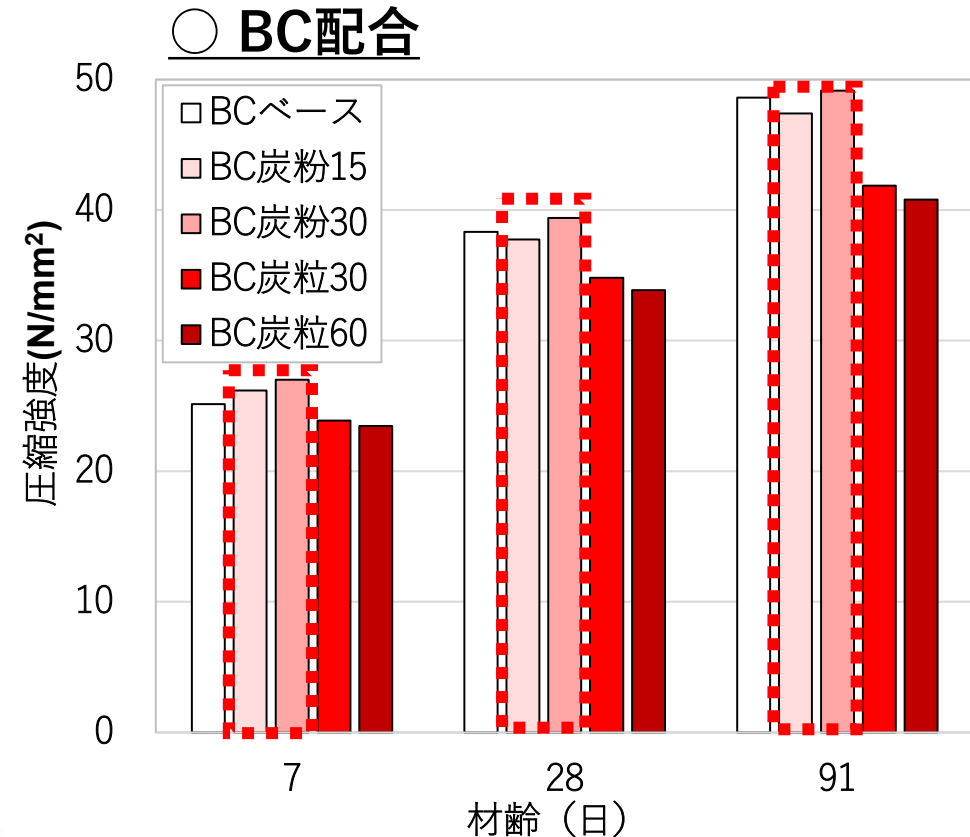
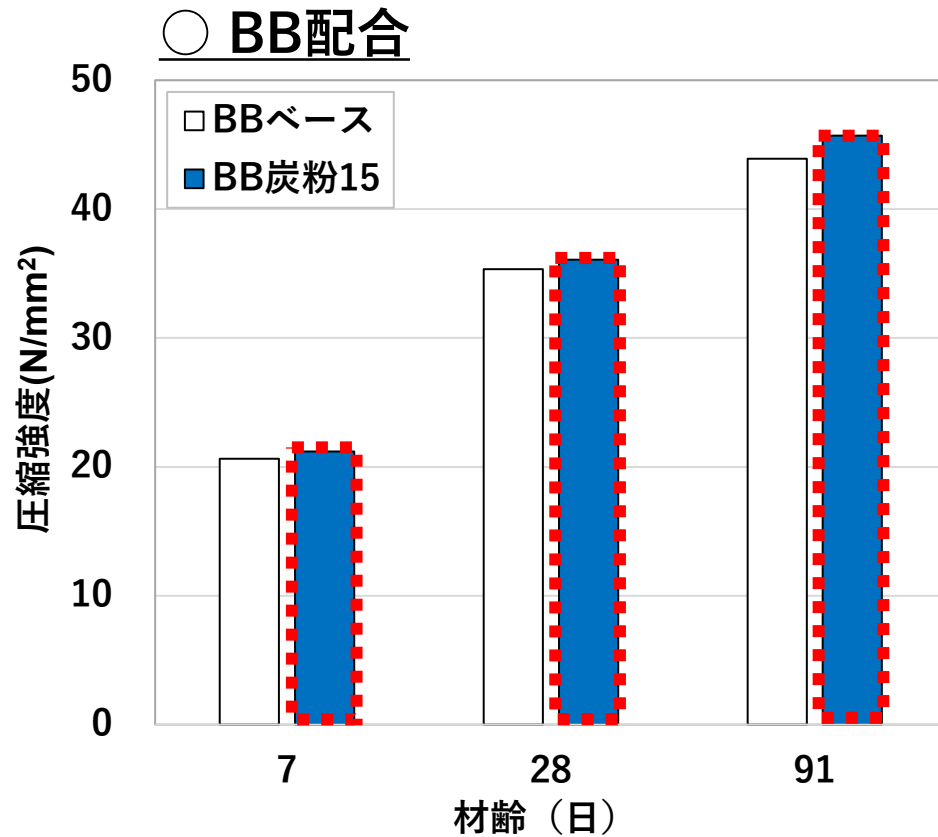
- ・ 圧送前後のフレッシュ性状の変化に着目すると、バイオ炭混和による影響は確認できなかった。  
 （ベース配合の最大スランプ低下量：2.0cm） = （バイオ炭混和配合の最大スランプ低下量：1.5cm）
- ・ 圧力損失については、バイオ炭の混和量増加に伴い、若干大きくなった。

⇒ **バイオ炭混和によるポンプ圧送性への影響は小さい**

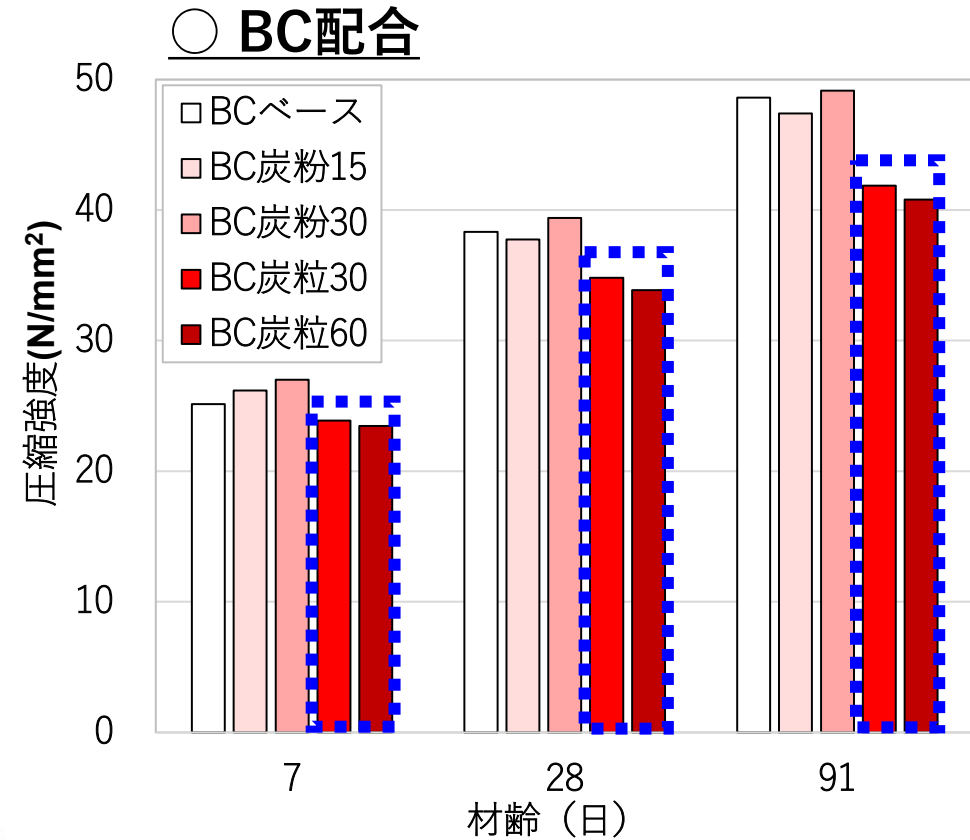
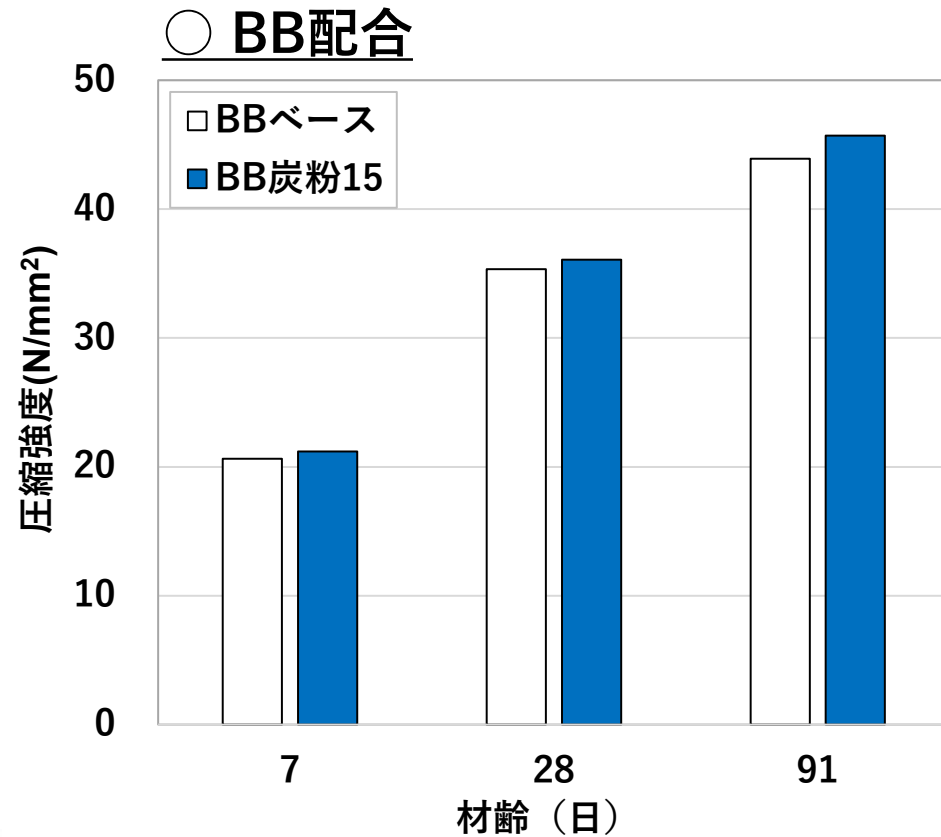


- ・ 粉状のバイオ炭を混和することによる圧縮強度への影響はほとんどない。
- ・ 粒状のバイオ炭を混和した場合、ベース配合と比較して圧縮強度は若干低い。  
⇒ 粒状のバイオ炭を混和した場合はバイオ炭が弱部となり、圧縮強度が低下する可能性あり。  
ただし、BC炭粒60でも  $\sigma_{28}$  で  $33.9\text{N/mm}^2$  出ていたことから、**一般的な土木構造物への適用は可能。**

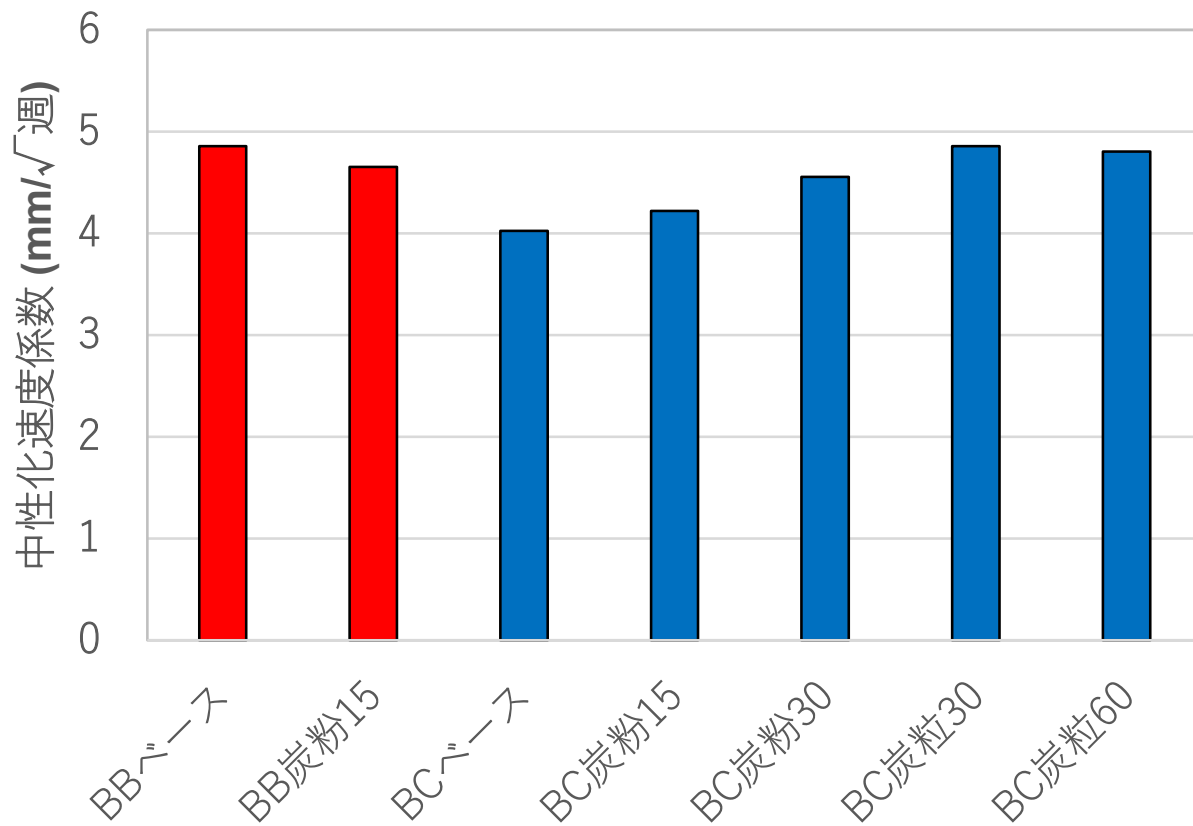




- ・ 粉状のバイオ炭を混和することによる圧縮強度への影響はほとんどない。
- ・ 粒状のバイオ炭を混和した場合、ベース配合と比較して圧縮強度は若干低い。  
⇒ 粒状のバイオ炭を混和した場合はバイオ炭が弱部となり、圧縮強度が低下する可能性あり。  
ただし、BC炭粒60でも  $\sigma_{28}$  で  $33.9\text{N/mm}^2$  出ていたことから、一般的な土木構造物への適用は可能。



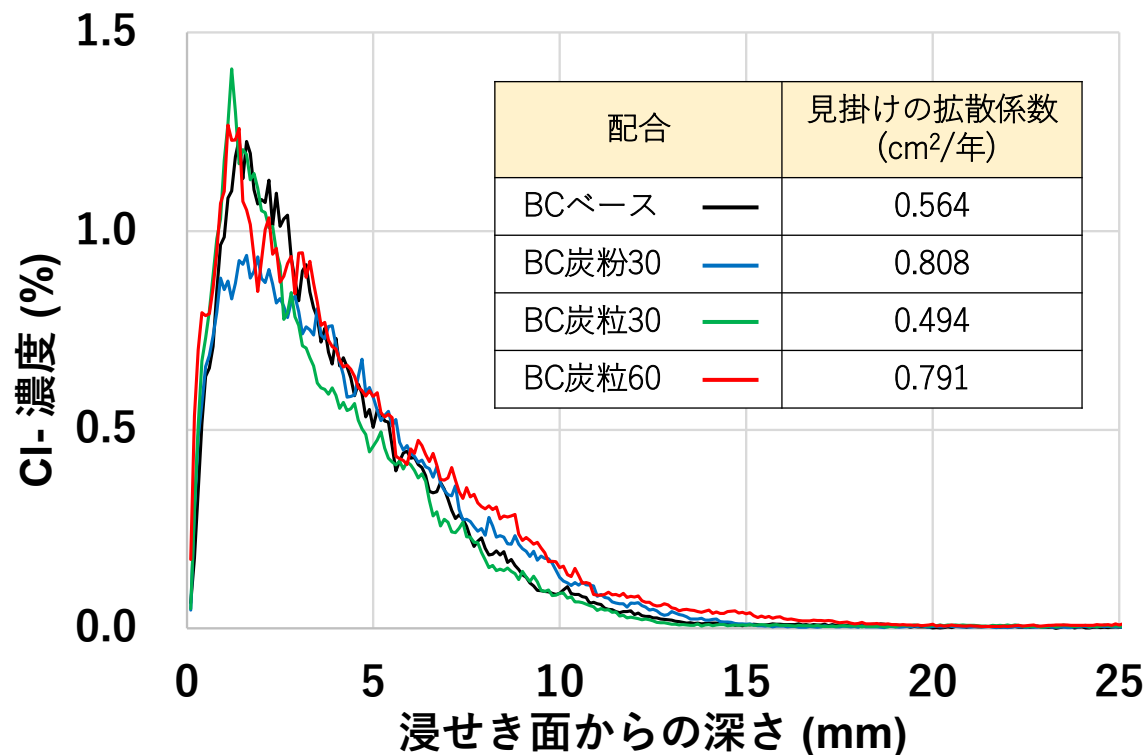
- ・ 粉状のバイオ炭を混和することによる圧縮強度への影響はほとんどない。
- ・ 粒状のバイオ炭を混和した場合、ベース配合と比較して圧縮強度は若干低い。  
⇒ 粒状のバイオ炭を混和した場合はバイオ炭が弱部となり、圧縮強度が低下する可能性あり。  
ただし、BC炭粒60でも  $\sigma_{28}$  で  $33.9\text{N/mm}^2$  出ていたことから、**一般的な土木構造物への適用は可能。**



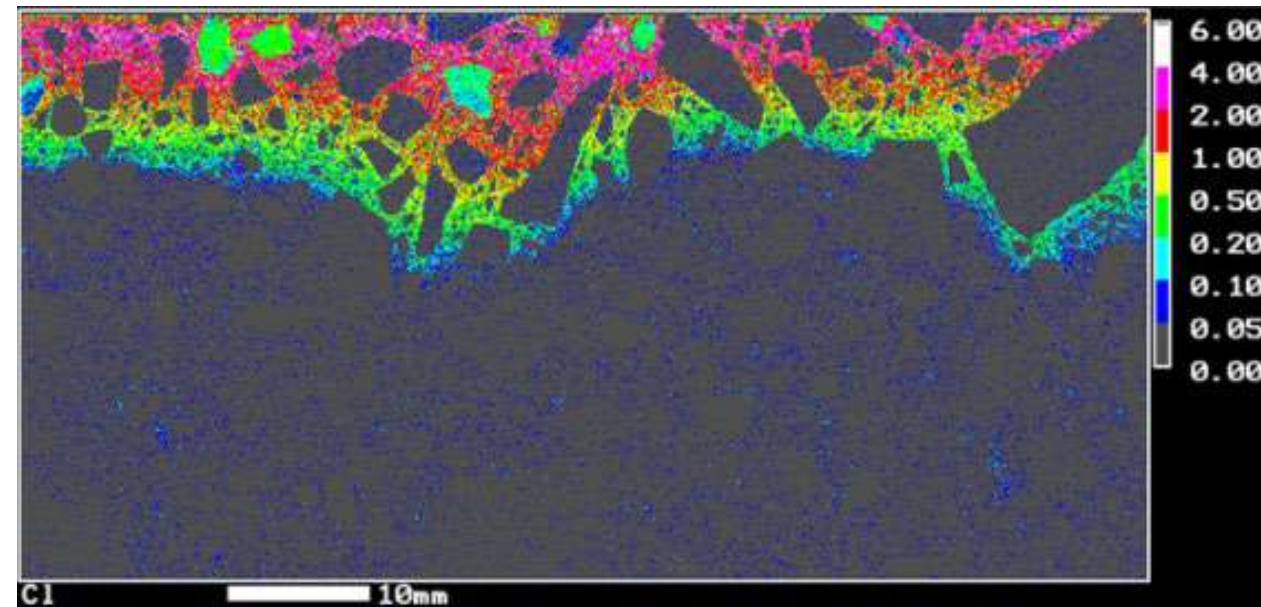
□ **BC炭粒60**：促進期間91日後  
(中性化深さ17.3mm)



バイオ炭の混和量が増加するに伴い、若干中性化の進行は早くなるが、概ね同等である。

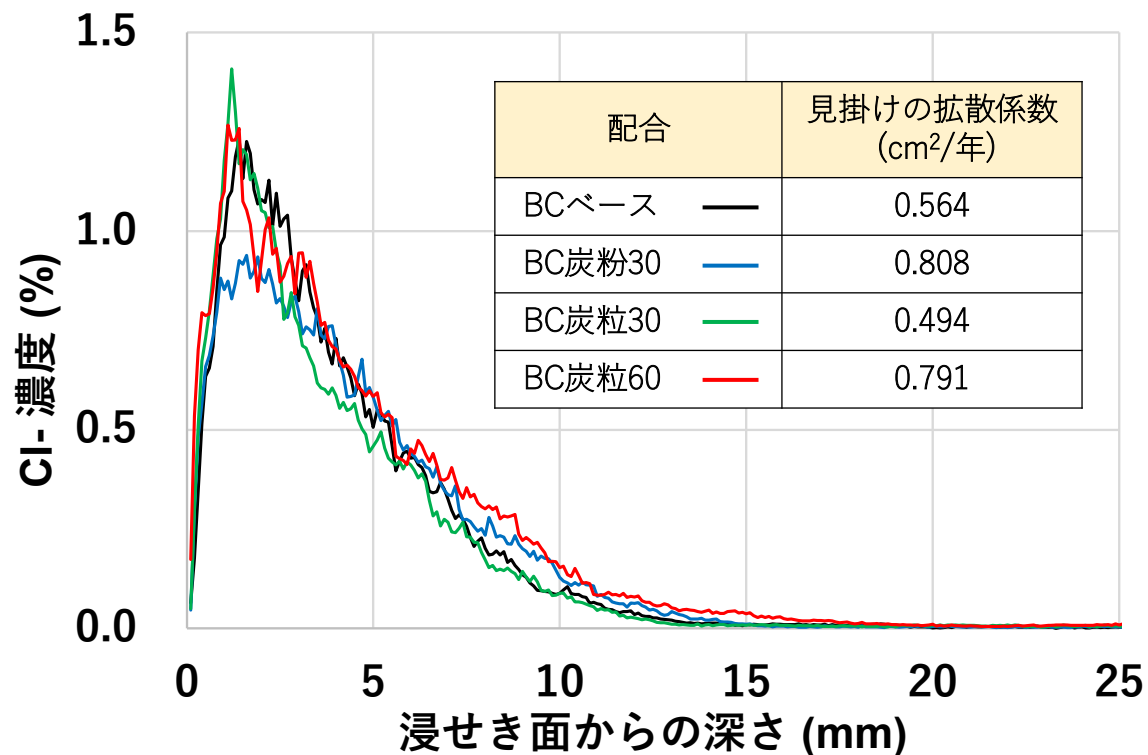


□ **BC炭粒60**のCl分布分析画像（EPMA）

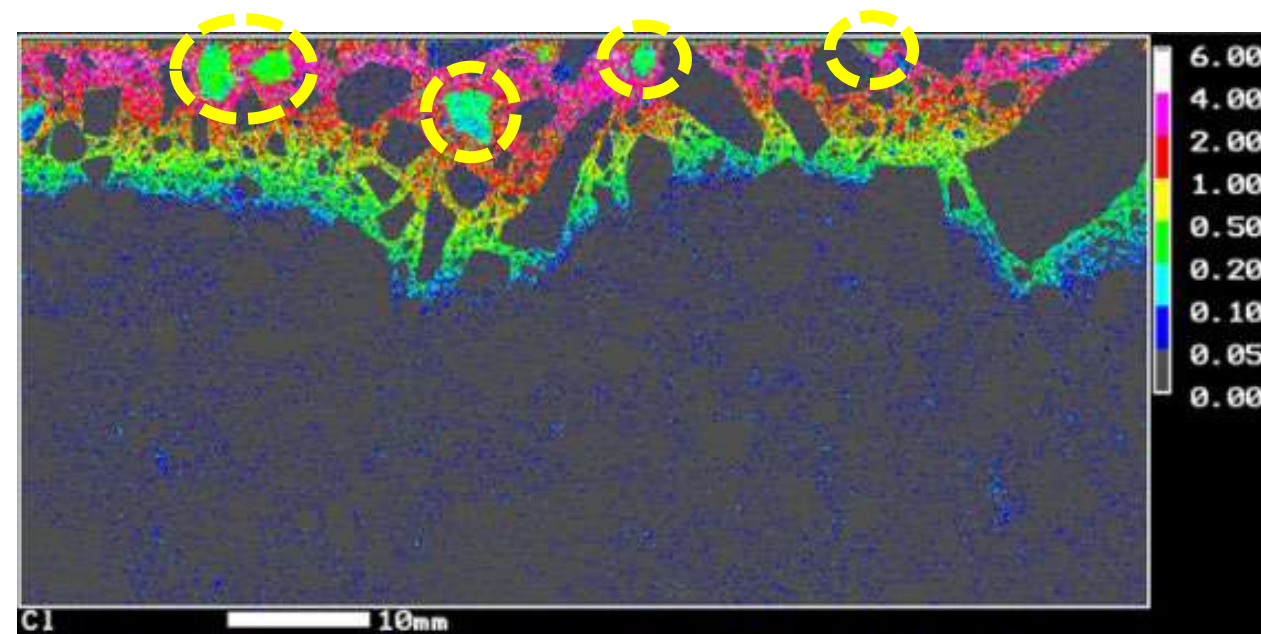


- ・ **塩化物イオンの浸透深さはどの配合もほぼ同等。**
- ・ 塩化物イオンの見掛けの拡散係数は配合ごとに差があるものの、一意的な傾向は確認できない。
- ・ **粒状のバイオ炭は塩化物イオンを吸着している**ことがEPMAの分析画像からわかる。  
⇒ 吸着した塩化物イオンのその後の挙動については今後把握する必要あり。





□ **BC炭粒60**のCl分布分析画像（EPMA）



- ・ **塩化物イオンの浸透深さはどの配合もほぼ同等。**
- ・ 塩化物イオンの見掛けの拡散係数は配合ごとに差があるものの、一意的な傾向は確認できない。
- ・ **粒状のバイオ炭は塩化物イオンを吸着している**ことがEPMAの分析画像からわかる。  
⇒ 吸着した塩化物イオンのその後の挙動については今後把握する必要あり。



# 発表の流れ

1. はじめに
2. バイオ炭による炭素貯留の考え方
3. 検討配合
4. 各種物性試験結果
- 5. 現場適用**
6. まとめ

## 新東名川西工事（中日本高速道路(株)）にてバイオ炭混和コンクリートを現場適用した。

セメント 種類	粗骨材 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						混和剤添加量		CO <sub>2</sub> 排出量 (kg/m <sup>3</sup> )
						W	C	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	G	バイオ炭 (粒)	AE減水剤 (C×wt%)	AE助剤 (A)	
BB	20	12±2.5	4.5±1.5	55.0	45.5	172	313	593	198	951	60	1.0	2.5	7

- ・適用箇所：仮設舗装コンクリート
- ・適用数量：**34.5m<sup>3</sup>**
- ・CO<sub>2</sub>削減効果（34.5m<sup>3</sup>あたり）

従来配合(18-8-25N)のCO<sub>2</sub>排出量：6.85t

適用配合(24-12-25BB+バイオ炭)のCO<sub>2</sub>排出量：0.23t

→ 6.85t - 0.23t = **6.62tのCO<sub>2</sub>削減**





製造バッチごとの品質のばらつきを確認した。

試験項目	1台目 練り直	1台目 荷卸し	4台目 練り直	8台目 練り直
スランプ (cm)	14.0	10.5	12.0	12.0
空気量 (%)	5.5	4.5	6.0	5.5
コン温度 (°C)	20	20	20	20

→ 1日を通してコンクリートの性状は安定していた。









- コンクリート材料としてバイオ炭を混和することで、製造における実質的なカーボンニュートラル・カーボンネガティブを実現可能である。
- バイオ炭を混和した場合でも混和剤量の調整によって無混和のものと同様のフレッシュ性状および施工性を確保可能である。（ポンプ圧送も可能）
- 粉状のバイオ炭を混和した場合の圧縮強度は無混和のものと同様、粒状のバイオ炭を混和した場合の圧縮強度は無混和のものよりも若干低くなる。
- バイオ炭を混和したコンクリートは普通コンクリートと同様に現場打ち施工が可能である。