

バイオ炭を混和した環境配慮型コンクリートの現場適用

SUSMICS-C【Sustainable+SMI(炭)+Carbon Storage+Concrete】の開発

幸 田 圭 司

コンクリート分野におけるカーボンニュートラル社会の実現に向けて、バイオ炭を混和した環境配慮型コンクリートを開発した。バイオ炭はバイオマスが大気中から吸収したCO₂を難分解性の炭素として固定化した材であり、これをコンクリートに混和することで炭素貯留することが可能である。本稿は、バイオ炭を混和したコンクリートのCO₂排出削減効果およびコンクリートとしての基本的な性能試験結果、実現場で適用した事例について紹介する。

キーワード：脱炭素、カーボンニュートラル、環境配慮型コンクリート、バイオ炭、現場適用

1. はじめに

2050年のカーボンニュートラル社会の実現に向けて、建設産業においても他産業と同様にCO₂を主とする温室効果ガスの排出量削減技術が求められている。日本におけるコンクリートの製造における年間のCO₂総排出量は約2,500万tとされており¹⁾、これは我が国の年間の温室効果ガス排出量の約2%を占めている。そのため、コンクリート製造時のCO₂排出量を削減することができれば、カーボンニュートラル社会の実現に大きく寄与することになる。

著者らはカーボンニュートラル社会の実現に向け、普通コンクリートと施工性および品質が同等の汎用的な環境配慮型コンクリートの実現を目的に、バイオ炭を混和することで炭素貯留するコンクリート（以下、バイオ炭コンクリート）の開発を行っている^{2)~4)}。本稿ではその概要および現場適用事例を紹介する。

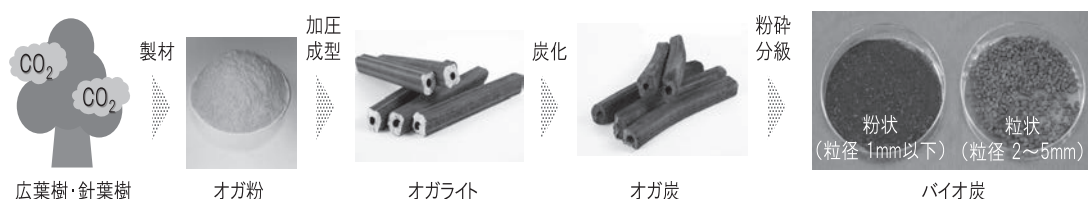
2. バイオ炭コンクリートによるCO₂排出量削減効果

(1) バイオ炭による炭素貯留

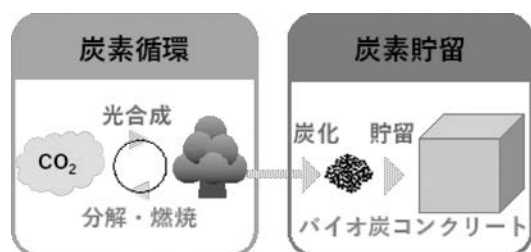
バイオ炭は、2019年改良IPCCガイドラインにお

いて、「燃焼しない水準に管理された酸素濃度の下、350℃超の温度でバイオマスを加熱して作られる固形物」と定義されている⁵⁾。その特長は、バイオマスを構成していた炭素が炭化されることで変化した、通常の下自然条件下においては分解しにくい炭素である難分解性炭素を高比率で含有する点が挙げられる。図—1に本開発で使用したバイオ炭の製造工程を示す。製材所で副産物として発生するオガ粉を工場に運搬し、加圧成型してオガライトとした後に炭化することでバイオ炭（オガ炭）を製造している。これを粉砕・分級することで粉状（約1mm以下）と粒状（約2～5mm）のバイオ炭になり、要求性能に応じてこれらを使い分けてコンクリートに混和している。

バイオ炭による炭素貯留の概念図を図—2に示す。バイオマス中の炭素は、元をたどれば植物が光合成によって大気中のCO₂を吸収したものであるが、燃料として利用されたり、微生物に分解されたりして再び大気中にCO₂が放出される。一方で、バイオマスが炭化されてバイオ炭になると、燃焼されない限りCO₂にほとんど変化しなくなる。よって、バイオマスをバイオ炭に転換し貯留すれば、炭素循環の中で大気中に放出されるCO₂を減らすことができる。これがバイオ炭による炭素貯留の考え方である。



図—1 本検討で使用したバイオ炭の製造過程



図ー2 バイオ炭コンクリートの炭素貯留

(2) バイオ炭コンクリートの特長

バイオ炭コンクリートはバイオ炭が有する炭素をコンクリート内部に長期的に貯留する特長を有する。混和したバイオ炭量から定量的に算出されるCO₂固定量で、セメントなど材料由来のCO₂排出量を相殺することで、コンクリートとしてカーボンニュートラルさらにはカーボンネガティブの達成が可能である。

(3) バイオ炭コンクリートのCO₂固定量

バイオ炭による炭素貯留の特性を利用し、国内のカーボンクレジット制度であるJ-クレジット制度では、バイオ炭を農地土壌へ施用することで、土壌への炭素貯留を認める方法論⁵⁾が2020年に策定された。本方法論は2019年にIPCCから発行された改訂ガイドラインに準拠しており、その中ではバイオ炭施用による炭素貯留量をtCO₂単位(CO₂質量)で求める方法が定められている(以下、炭素貯留量をCO₂質量で示したものをCO₂固定量と呼称する)。バイオ炭混和によるコンクリートへの炭素貯留の方法論は、現時点においてIPCCガイドラインおよびJ-クレジット制度で定められていないため、上記のJ-クレジット制度を参照してバイオ炭コンクリートのCO₂固定量を計算している。なお、海外の一部のボランタリークレジットではすでにコンクリートへの炭素貯留も認証対象として扱われている事例がある⁶⁾。

(a) バイオ炭の実質的なCO₂固定量

バイオ炭を混和したコンクリートへのCO₂固定量を評価するためには、バイオ炭製造時のCO₂排出量を考慮したバイオ炭の実質的なCO₂固定量を評価しておく必要がある。バイオ炭の実質的なCO₂固定量は式(1)および式(2)より算出した。

$$CF_{total} = CF_{BC} - CE_{BC} \quad (1)$$

$$CF_{BC} = F_C \times F_{perm} \times 44/12 \quad (2)$$

CF_{total} : バイオ炭の実質的なCO₂固定量 (kg-CO₂/kg)

CF_{BC} : バイオ炭によるCO₂固定量 (kg-CO₂/kg)

CE_{BC} : バイオ炭製造に関わるCO₂排出量 (kg-CO₂/kg)

F_C : バイオ炭の炭素含有率 (%)

F_{perm} : バイオ炭の100年後の炭素残存率 (%)

J-クレジットの方法論⁵⁾よりオガ炭の100年後の炭素残存率は89%とされている。

44/12: 炭素重量をCO₂重量に変換する係数

式(2)のバイオ炭製造に関わるCO₂排出量は製造メーカーの実績を適用し、バイオ炭の炭素含有率は成分分析の結果を適用している。以上より、今回現場で使用したバイオ炭の実質的なCO₂固定量は約2.3 kg-CO₂/kgと算出された。

(b) バイオ炭コンクリートのCO₂排出量

バイオ炭コンクリートのCO₂排出量 (kg-CO₂/m³)は、構成材料ごとのCO₂排出原単位に使用量に乗じたものの和として求めた。バイオ炭コンクリート配合のCO₂排出量の算定結果の一例を表ー1に示す。CO₂排出量の計算に使用した各材料のCO₂排出原単位^{7)~10)}を含む材料の諸元を表ー2に示す。バイオ炭のCO₂固定量で他材料のCO₂排出量をオフセットしてコンクリートとしてカーボンニュートラルを実現できるように、CO₂排出原単位の小さい高炉セメントを使用している。表ー1の例では、高炉セメントC種を使用

表ー1 バイオ炭コンクリートの配合およびCO₂排出量の一例

セメント 種類	配合略称	粗骨材 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							混和剤添加量		CO ₂ 排出量 (kg/m ³)
							W	C	S ₁	S ₂	G	バイオ炭 (粉)	バイオ炭 (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	141
	BB炭粉15					44.7	169	307	318	475	1008	15	0	1.8	15.0	106
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	95
	BC炭粉15					44.7	169	338	311	466	989	15	0	1.2	7.0	60
	BC炭粉30					43.9	169	338	301	451	989	30	0	1.4	7.0	26
	BC炭粒30					43.9	169	338	301	451	989	0	30	1.0	5.0	26
	BC炭粒60					42.3	169	338	282	422	989	0	60	1.2	7.0	-43

表一 2 使用材料の諸元

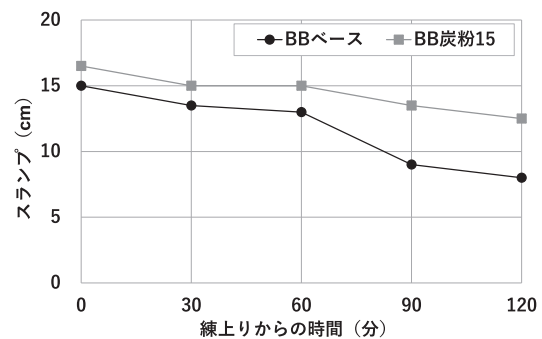
使用材料	産地・仕様	CO ₂ 排出原単位 (kg-CO ₂ /kg)
水 (W)	地下水	0.00025 ⁷⁾
セメント (C)	BB (高炉セメント B 種)・・・密度:3.04 g/cm ³	0.44 ⁸⁾
	BC (高炉セメント C 種)・・・密度:2.96 g/cm ³	0.26 ⁹⁾
細骨材① (S ₁)	栃木県佐野市産砕砂, 表乾密度:2.66 g/cm ³	0.0035 ¹⁰⁾
細骨材② (S ₂)	千葉県市原市万田野産山砂, 表乾密度:2.60 g/cm ³	0.0035 ¹⁰⁾
粗骨材 (G)	栃木県佐野市産碎石, 表乾密度:2.70 g/cm ³	0.0028 ¹⁰⁾
バイオ炭	原料:オガ粉, 密度:1.60 g/cm ³ , 炭素含有率:77.6%	-2.3
AE 減水剤	変性リグニンスルホン酸化合物・ポリカルボン酸系化合物の複合体	-
AE 剤	高級脂肪酸塩・非イオン系界面活性剤 (バイオ炭混和配合)	-
	高級脂肪酸・非イオン系界面活性剤 (バイオ炭混和配合)	-
	アルキルエーテル型陰イオン界面活性剤 (バイオ炭無混和配合)	-

して 60 kg/m³ のバイオ炭を混和することで CO₂ 排出量が 0 kg 以下, 即ちカーボンネガティブを実現できることになる。

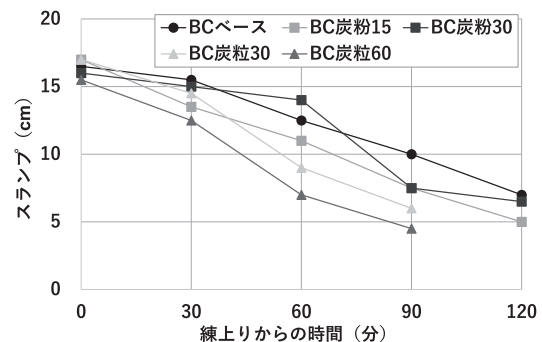
3. バイオ炭コンクリートの性能

(1) フレッシュ性状

バイオ炭コンクリートのフレッシュ性状は, 表一 1 に示すように, AE 減水剤や AE 剤といった混和剤の添加量を調整することで所定のスランプ・空気量が得られることを確認している。バイオ炭は多孔質の材料であり, コンクリート中の自由水や混和剤を吸着するため, それを補うように混和剤量を増加させることでフレッシュ性状を担保している。表一 3 に練上り直後のフレッシュ性状試験結果を, 図一 3 および図一 4 にスランプの経時変化試験結果を示す。バイオ炭を混和していないベース配合と比較して若干スランプロスが大きい水準もあるが, 大きく逸脱するほどではなかった。また, 写真一 1 に示すように水平換算距離 150 m 程度の配管を組み, 実際にポンプ圧送を行い, 圧送前後のコンクリートのスランプ・空気量の変化を確認した。結果を表一 4 に示すが, 圧送後でも大き



図一 3 スランプ経時変化 (BB 配合)



図一 4 スランプ経時変化 (BC 配合)

表一 3 練上り直後のフレッシュ性状試験結果

	BC ベース	BB 炭粉 15	BC ベース	BC 炭粉 15	BC 炭粉 30	BC 炭粒 30	BC 炭粒 60
スランプ (cm)	15.0	16.5	16.5	17.0	16.0	17.0	15.5
空気量 (%)	5.3	5.6	5.1	5.7	5.1	4.8	4.9
Con 温度 (℃)	23	23	22	21	22	24	24



写真一 1 圧送試験配管組立状況

な性状変化は生じておらず、問題なく圧送できることを確認できている。

(2) 圧縮強度

図―5 および図―6 にバイオ炭コンクリートの圧縮強度試験の結果を示す。バイオ炭コンクリートの圧縮強度は一般的なコンクリートと概ね同等であることが確認されている。粒状のバイオ炭を混和した場合は若干圧縮強度がベース配合と比較して小さくなる傾向が認められるが、バイオ炭自体がコンクリートと比較して強度が低いため、力学的な弱部となった可能性が考えられる。しかしながらその影響は限定的であり、圧縮強度が最も小さかったBC炭粒60でも材齢28日で33.9 N/mm² 発現しており、一般的な工事に用いられる汎用的な強度を満足できることが確認できている。

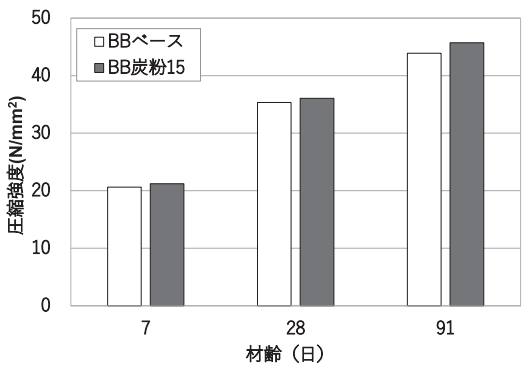
表―4 圧送前後のフレッシュ性状試験結果

配合	状態	スランプ (cm)	空気量 (%)	Con 温度 (℃)
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 炭粒 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

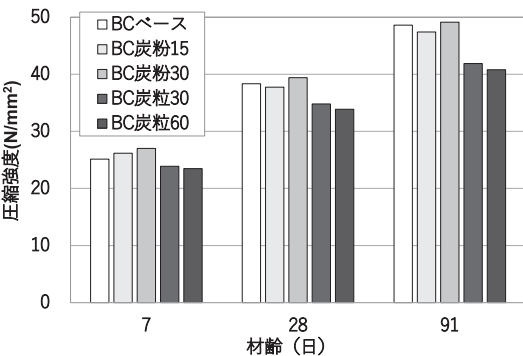
4. 現場適用事例

表―5 にバイオ炭コンクリートを現場適用した2つの事例について、概要を示す。

事例1の土木工事における仮設舗装への適用について、使用した配合および材料の諸元を表―6 および表―7 に示す。なお、バイオ炭の密度は実際に現場適用時に使用した製造ロットで分析した結果を基にしているため、表―2の数値とは若干異なっている。本施工で適用したコンクリートの1 m³あたりのCO₂



図―5 圧縮強度試験結果 (BB 配合)



図―6 圧縮強度試験結果 (BC 配合)

表―5 現場適用事例

	工事分類	適用先	打設方法	適用数量 (m ³)	バイオ炭 混和量 (kg/m ³)	適用配合の CO ₂ 排出量 (kg/m ³)	設計配合比の CO ₂ 排出低減量 (t)
事例1	土木	仮設舗装	ホッパー・バケット打ち	34.5	60	6.7	6.6
事例2	建築	レベルコンクリート	ポンプ打ち	510	60	−15.6 および −13.3*	65.9

※ 2工場からの供給であり、A工場が−15.6 kg/m³、B工場が−13.3 kg/m³である。

表―6 適用配合 (事例1)

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 ³)						AE 減水剤 (C×wt%)	AE 助剤 (A)	CO ₂ 排出量 (kg/m ³)
						W	C	S ₁	S ₂	G	バイオ炭 (粒)			
BB	20	12±2.5	4.5±1.5	55.0	45.5	172	313	593	198	951	60	1.0	2.5	6.7

表—7 使用材料の諸元（事例1）

使用材料	産地・仕様	CO ₂ 排出原単位 (kg-CO ₂ /kg)
水 (W)	地下水	0.00025
セメント (C)	BB (高炉セメント B 種)・・・密度：3.04 g/cm ³	0.44 ⁸⁾
細骨材① (S ₁)	山梨県南巨摩郡南部町産砕砂，表乾密度：2.66 g/cm ³	0.0035 ¹⁰⁾
細骨材② (S ₂)	住友金属鉱山(株) 東予工場産銅スラグ，表乾密度：3.50 g/cm ³	0.0035 ¹⁰⁾
粗骨材 (G)	山梨県大月市初狩町産碎石，表乾密度：2.62 g/cm ³	0.0028 ¹⁰⁾
バイオ炭	原料：オガ粉，密度：1.75 g/cm ³ ，炭素含有率：76.8%	-2.3
AE 減水剤	変性リグニンスルホン酸化合物・ポリカルボン酸系化合物の複合体	-
AE 剤	高級脂肪酸塩・非イオン系界面活性剤	-

排出量は 6.7 kg/m³ であり，ほぼカーボンニュートラルを達成できていると言える。施工時の状況を写真—2 および写真—3 に示す。打込みはホッパーおよびバケットで行ったが，コンクリートの施工性や仕上りは良好であった。

次に，事例2の建築工事におけるレベルコンクリートへの適用について，使用した配合および材料の諸元を表—8 および表—9 に示す。事例1と比較して，単位セメント量が少ない配合であることから，事例1とバイオ炭混和量は同様であるものの，本配合の 1 m³ あたりの CO₂ 排出量はマイナスの値となっており，カーボンネガティブを実現できている。また，写真—4 および写真—5 に示すように，本施工はポンプ打ちで行ったが，閉塞等のトラブルを生じることなく，通常通りの施工ができており，仕上りも良好であった。



写真—2 コンクリート打込み状況（事例1）



写真—3 仕上り状況（事例1）

表—8 適用配合（事例2）

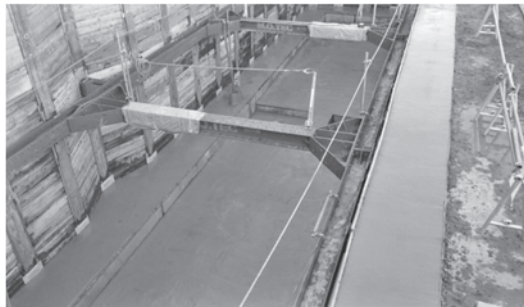
工場	セメント 種類	粗骨材 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							AE減水剤 (C×wt%)	CO ₂ 排出量 (kg/m ³)
							W	C	S ₁	S ₂	G	バイオ炭 (粉)	バイオ炭 (粒)		
A	BB	20	15±2.5	3.0±1.5	64.9	47.5	174	268	543	240	993	20	40	1.7	-15.6
B					63.3	48.9	173	273	800	0	975	20	40	1.5	-13.3

表—9 使用材料の諸元（事例2）

使用材料	産地・仕様	CO ₂ 排出原単位 (kg-CO ₂ /kg)
水 (W)	地下水	0.00025 ⁷⁾
セメント (C)	BB (高炉セメント B 種)・・・密度：3.04 g/cm ³	0.44 ⁸⁾
工場 A 細骨材① (S ₁)	茨城県潮来市産砂，表乾密度：2.60 g/cm ³	0.0035 ¹⁰⁾
工場 A 細骨材② (S ₂)	栃木県栃木市産砕砂，表乾密度：2.67 g/cm ³	0.0035 ¹⁰⁾
工場 A 粗骨材 (G)	栃木県栃木市産碎石，表乾密度：2.67 g/cm ³	0.0028 ¹⁰⁾
工場 B 細骨材	茨城県神栖市産砂，表乾密度：2.59 g/cm ³	0.0035 ¹⁰⁾
工場 B 粗骨材	栃木県佐野市産碎石，表乾密度：2.70 g/cm ³	0.0028 ¹⁰⁾
バイオ炭	原料：オガ粉，密度：1.61 g/cm ³ ，炭素含有率：78.1%	-2.3
AE 減水剤	リグニンスルホン酸塩・オキシカルボン酸塩	-



写真—4 コンクリート打込み状況（事例2）



写真—5 仕上り状況（事例2）

《参考文献》

- 1) (一社)日本建設業連合会 HP より「低炭素型コンクリートの普及促進に向けて」参照：https://www.nikkenren.com/publication/fl.php?fi=444&f=low-carbon_pamph_A4.pdf（閲覧日：2024年2月7日）
- 2) 幸田 圭司, 木原 亮太, 山本 伸也, 清水 和昭, 田中 博一, 久保 昌史：バイオ炭を混和した環境配慮型コンクリートのフレッシュ性状, 土木学会第77回年次学術講演会, V-244, 2022
- 3) 木原 亮太, 幸田 圭司, 山本 伸也, 清水 和昭, 田中 博一, 久保 昌史：バイオ炭を混和した環境配慮型コンクリートの硬化性状, 土木学会第77回年次学術講演会, V-245, 2022
- 4) 幸田 圭司, 久保 昌史, 山本 伸也, 田中 博一：バイオ炭を混和した環境配慮型コンクリートの基礎物性, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.1222-1227, 2023
- 5) Jクレジット制度 HP より バイオ炭の農地施用方法論参照：https://japancredit.go.jp/pdf/methodology/AG-004_v1.4.pdf（閲覧日：2024年2月7日）
- 6) Carbonfuture HP より Biochar Concrete Applications by Carbonex 参照：https://verra.org/wp-content/uploads/Biochar_Methodology-Assessment-Report_v1.1_clean.pdf（閲覧日：2024年2月7日）
- 7) 東京都水道局 HP より：<https://www.waterworks.metro.tokyo.lg.jp/kurashi/co2.html>（閲覧日：2024年2月7日）
- 8) (一社)セメント協会：セメントの LCI データの概要, 2022.3
- 9) 辻 大二郎, 小島 正朗, 檀 康弘：二酸化炭素 (CO₂) 排出量を6割削減できる高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの実工事への適用, 建設機械施工 Vol.69, No.3, pp.9-14, 2017.3
- 10) 河合 研至：コンクリートの環境負荷評価 ②コンクリートに関わる環境負荷評価方法, コンクリート工学 Vol.50, No.7, pp.635-639, 2012.7

5. おわりに

本稿では、カーボンニュートラルの実現に向けて開発したバイオ炭コンクリート（SUSMICS-C）の概要および現場適用事例について紹介した。今後は非構造部材で実績を拡大していくとともに、構造部材への適用も視野に入れ、第三者認証の取得に向けても検討を進める。

JCM A

【筆者紹介】

幸田 圭司（ゆきた けいじ）

清水建設㈱

土木技術本部 基盤技術部 コンクリート G
主任