

竹炭を添加した生型砂の特性に及ぼす粒度分布の影響

森 康暢*, 近藤義大*, 赤田英里*, 井上幸司*

Effect of Particle Size Distribution of Bamboo Charcoal on the Properties of Green Sand

Yasunobu MORI, Yoshihiro KONDO, Eri AKADA and Koji INOUE

In this study, the applicability of bamboo charcoal as an alternative carbonaceous additive to seacoal was investigated. Green sand tests were carried out using bamboo charcoal powders prepared by different crushing methods in order to evaluate the effects of particle size distribution and particle morphology on green sand properties. Bamboo charcoal powder A, crushed using a disintegrator, contained a relatively large fraction of coarse particles and showed a tendency toward lower green compressive strength. In contrast, bamboo charcoal powder B, produced using a hammer crusher, exhibited green compressive strength comparable to that obtained with seacoal and maintained a high surface stability index, suggesting a potentially favorable effect on mold surface stability. On the other hand, the water content required to obtain the same compactability increased when bamboo charcoal was added. These results indicate that the crushing method and particle size distribution of bamboo charcoal significantly influence green sand properties.

Keywords: Bamboo Charcoal, Green Sand, Particle Size Distribution, Foundry Additives, Coal Dust Substitute

1. 背景

三重県北勢地域では竹林が広く分布しており、タケノコは地域の特産品として出荷されている。しかし近年、竹林所有者の高齢化等により放置竹林が増加し、獣害などの問題が深刻化している¹⁾。竹林整備の過程で発生する竹材の一部は竹炭として加工され土壌改良剤として利用されているものの、需要は限定的であり、多くの竹資源が未利用となっているのが現状である。

一方、鑄造産業では生型鑄型中に石炭粉（シーコール）が添加され、鑄肌改善や焼付き防止のために広く使用されている²⁾。しかし石炭粉は化石資源由来の炭素質添加材であり、鑄造産業のカーボンニュートラル化の観点から、植物由来材料による代替が期待されている³⁻⁵⁾。

そこで本研究では、地域資源である竹炭に着目し、生型鑄型用添加剤としての利用可能性を検討

した。特に、竹炭の粉碎方法の違いが粒度分布に及ぼす影響、および粒度分布の違いが生型砂特性に与える影響について調査し、石炭粉代替材料としての適用可能性を評価した。

2. 実験方法

2.1 竹炭の粉碎および粒度評価

Fig.1 に本研究で使用した竹炭（受入状態）を示す。本研究では、この受入状態の竹炭を出発材料として使用した。竹炭の粉末化として、以下の方法で粉碎処理を行い、2 種類の竹炭試料を作製した。

まず、竹炭粉 A は乳鉢により受入状態の竹炭を人力で破碎した後、8 メッシュ（目開き 2.360 mm）のふるいを用いてふるい分けを行い、ふるい下の試料を回収した。回収した試料をさらにらいかい機を用いて自動粉碎した。粉碎条件は 1 バッチ当たり 50 g とし、粉碎時間は約 1 時間とした。

竹炭粉 B は、受入状態の竹炭をハンマークラ

* 金属研究室



Fig. 1 As-received bamboo charcoal before crushing.

ッシャー (NH-34S, 三庄インダストリー (株)) を用いて粉碎し, 0.7 mm メッシュのフィルターを通過したものを試料とした.

各竹炭粉試料について, レーザー回折/散乱式粒子径分布測定装置 (LA - 920, (株) 堀場製作所) を用いて粒度分布を測定した. また, 粒子形状を観察するため, 走査型電子顕微鏡 (SEM) (SU3800, (株) 日立ハイテク) による観察を行った. 比較のため, 市販の石炭粉についても同様の測定および観察を行った.

2.2 生型砂試験

鋳型砂には新砂 (フラタリーサンド, 6 号) を使用した. 結合材としてベントナイトを砂重量に対して 8 % 添加した. 炭素質添加材として, 竹炭粉 A, 竹炭粉 B および市販の石炭粉を用い, それぞれ砂重量に対して 3 % 添加した. また, 比較のため炭素質添加材を添加しない条件も設定した. 竹炭粉 A および竹炭粉 B は粉碎方法を変えることで粒度条件の異なる試料とした.

試験砂はシンプソンミキサー (容量 5 kg) を用いて混練した. まず, 新砂と水を投入し 1 分間混練した後, ベントナイトおよび炭素質添加材を加え, さらに 15 分間混練した. 混練後にコンパクタビリティ (CB) 値を測定し, CB 値が 40 ± 2 の範囲となるよう水分量を調整した.

生型砂試験は日本鋳造工学会東海支部法に準拠して実施した⁶⁾. 測定項目は鋳型密度, 通気度, 湿態圧縮強度および表面安定度 (SSI) とした. 各条件の試験砂について生型砂特性を比較し, 炭素質添加材の種類および粒度条件が生型砂特性に及ぼす影響を評価した.

3. 実験結果

3.1 粒度分布および SEM 観察

Fig. 2 に竹炭粉 A, 竹炭粉 B および石炭粉の SEM 観察結果を示す.

Fig. 2-(c) に示す石炭粉では, 角張った塊状の粒子が観察され, 粒径数十 μm 程度の微粒子から数百 μm 程度の比較的大きな粒子まで, 幅広い粒径の粒子が混在していた.

一方, Fig. 2-(a),(b) に示す竹炭粉 A および竹炭粉 B では, いずれの竹炭試料においても, 竹材由来の繊維構造に起因すると考えられる細長い粒子や板状粒子が多く観察され, 竹の導管構造が粉碎後も残存している様子が確認された.

Fig. 3 に各試料の粒度分布測定結果を, Table 1 に累積粒度を示す. メジアン径 (D_{50}) は竹炭粉 A が $65.14 \mu\text{m}$, 竹炭粉 B が $16.65 \mu\text{m}$, 石炭粉が $91.84 \mu\text{m}$ であり, 竹炭粉 B では粒径が小さい側へシフトしていた. また, D_{90} は竹炭粉 A が $208.96 \mu\text{m}$, 竹炭粉 B が $104.87 \mu\text{m}$, 石炭粉が $201.70 \mu\text{m}$ であり, 竹炭粉 B では粗粒子の割合が減少していることが確認された.

竹炭粉 A と竹炭粉 B を比較すると, ハンマークラッシャーを用いた竹炭粉 B では粉碎がより進行しており, SEM 観察においても導管構造を保持した粗大粒子の割合が減少していた.

竹炭は竹材の導管や繊維構造に由来する多孔質構造を有しており, 炭化後もこれらの組織形状は保持されるため, 粉碎時には細胞壁が崩壊して微粒子が生成される一方で, 導管構造を保持した比較的大きな粒子が残存する. このような構造的特徴により, 竹炭粉では微粒子と粗粒子が混在する粒度分布を示したものと考えられる.

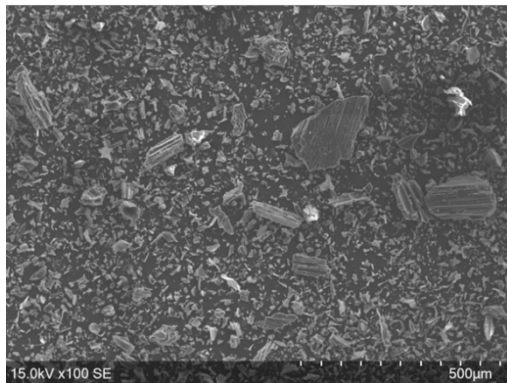
3.2 生型砂特性

Fig. 4 に各炭素質添加材を用いた場合の生型砂特性を示す. 図中のアルファベットは Tukey 検定による群分けを示し, 共通のアルファベットを持たない条件間には有意差があることを示す ($p < 0.05$). 例えば, Fig. 4-(d) において, 「a」と示された条件と「b」と示された条件の間には有意差が認められる一方, 「ab」と示された条件は, 「a」および「b」のいずれの条件とも有意差がないことを示す.

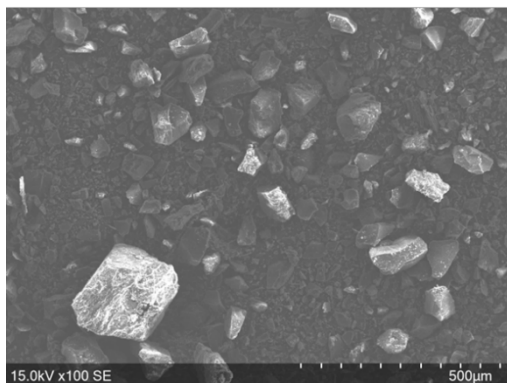
Fig. 4-(a) に示す水分については, 炭素質添加材の種類により差が見られ, 竹炭粉を添加した条件



(a) Bamboo charcoal A



(b) Bamboo charcoal B



(c) Seacoal

Fig. 2 SEM images of carbonaceous additives.

では添加材なしおよび石炭粉を用いた条件と比較して高い値を示した。この要因として竹炭の構造的特徴が影響していると考えられる。前節の SEM 観察結果より、竹炭粉では竹材由来の導管や繊維構造が粉碎後も残存していることが確認された。竹炭はこのような多孔質構造を有するため水分を保持しやすく、同一の CB 値を得るためには石炭

粉を用いた場合よりも多くの水分が必要になったものと考えられる。

Fig. 4-(b)に示すかさ密度については、各条件間で有意差は認められなかった。

Fig. 4-(c)に示す通気度については、添加材なしの条件が最も高い値を示し、石炭粉および竹炭粉を添加した条件では低下する傾向が見られた。炭素質添加材は一般に微粉成分を含むため、砂粒子間の空隙を充填し、通気度を低下させる。竹炭粉 A および竹炭粉 B と石炭粉の間では有意差は認められず、いずれも同程度の通気度を示した。

Fig. 4-(d)に示す湿体強度については、竹炭粉 B および石炭粉で比較的高い値を示し、竹炭粉 A ではやや低い値となった。検定の結果、石炭粉および竹炭粉 B は同一のグループに分類されており、竹炭粉 B では石炭粉と同等の湿体強度が得られることが確認された。一方、竹炭粉 A では粗粒子の割合が多く、粒度分布測定結果においても D50 および D90 が大きいことが確認されている。粗粒子は砂粒子間の空隙を十分に充填できないため、結合力の発現がやや低下した可能性がある。これに対し、竹炭粉 B では粉碎が進み微粒子成分が増加していることから、砂粒子間の空隙充填が促進され、結果として石炭粉と同等の湿体強度が得られたものと考えられる。

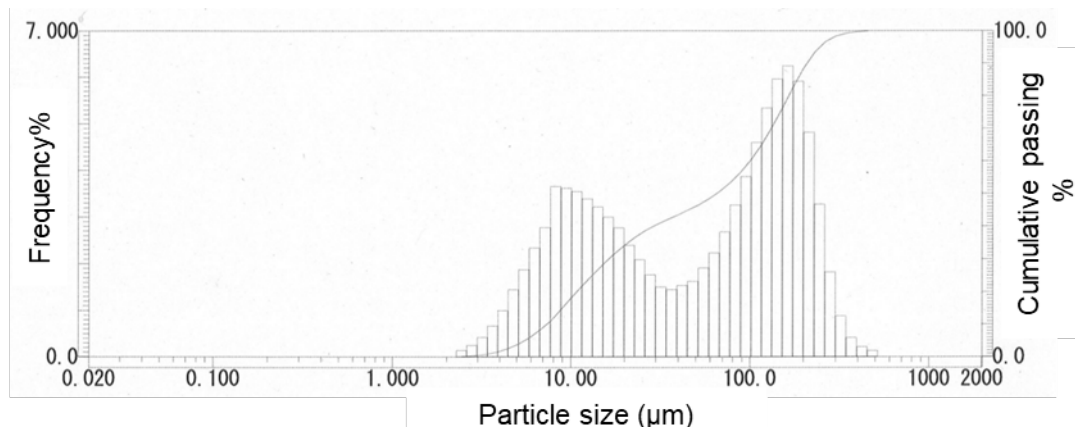
Fig. 4-(e)に示す表面安定度(SSI)については、石炭粉では無添加条件よりも低下する傾向が見られたのに対し、竹炭粉 B では無添加条件と同一のグループに分類されており、高い表面安定度が維持された。このことから、竹炭粉 B は石炭粉と比較して鑄型表面の安定性の観点で有利である可能性が示唆された。

本研究の結果から、竹炭の粉碎方法は粒度分布および生型砂特性に大きく影響することが確認された。特に、粗粒子の割合が多い竹炭粉 A では湿体強度が低下する傾向が見られたのに対し、粉碎が進み微粒子成分が増加した竹炭粉 B では石炭粉と同等の湿体強度が得られた。このことから、竹炭を炭素質添加材として利用するためには、適切な粉碎条件により粒度分布を制御することが重要であると考えられる。

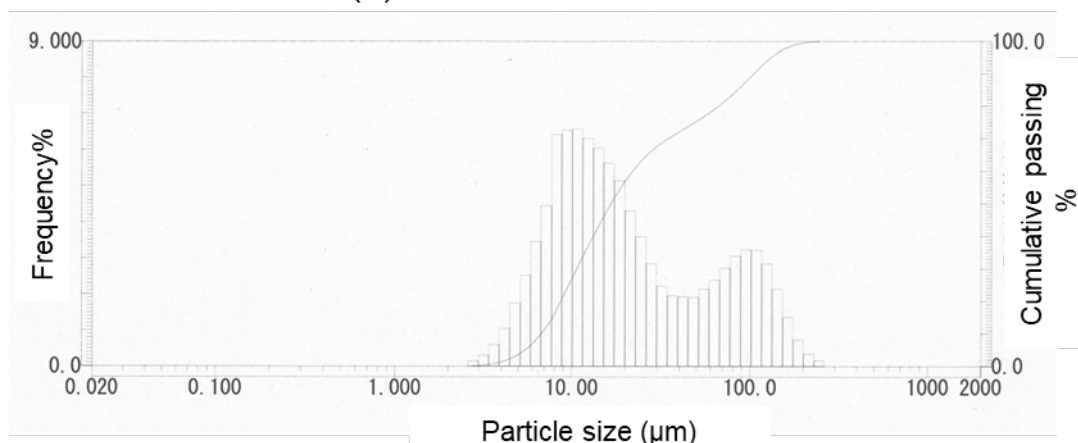
一方、本研究では竹炭を添加した条件において、同一の CB 値を得るために必要な水分量が増加する傾向が確認された。竹炭は植物由来の多孔質構

Table 1 Particle size distribution of bamboo charcoal powders and seacoal

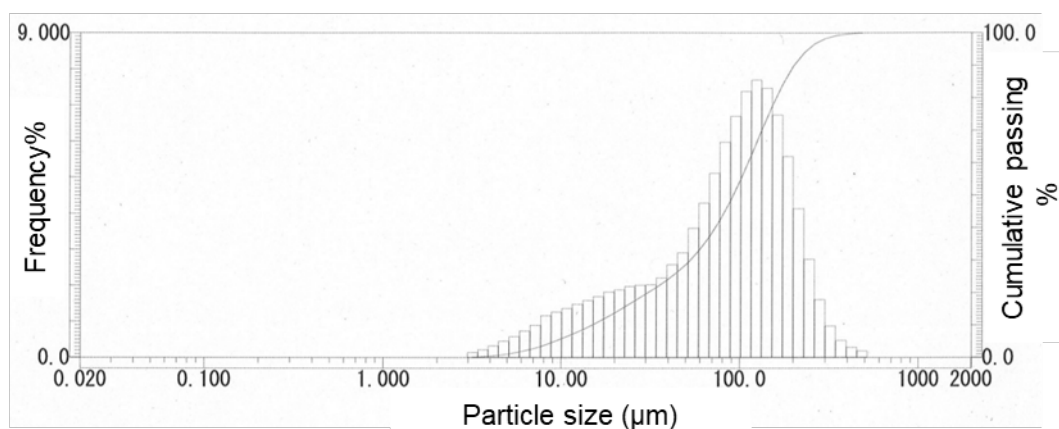
	D5 (μm)	D10 (μm)	D50 (μm)	D90 (μm)	D95 (μm)
Bamboo charcoal A	5.54	7.37	65.14	208.96	246.20
Bamboo charcoal B	5.45	6.76	16.65	104.87	131.39
Seacoal	9.31	14.94	91.84	201.70	242.36



(a) Bamboo charcoal A



(b) Bamboo charcoal B



(c) Seacoal

Fig. 3 Particle size distributions of carbonaceous additives.

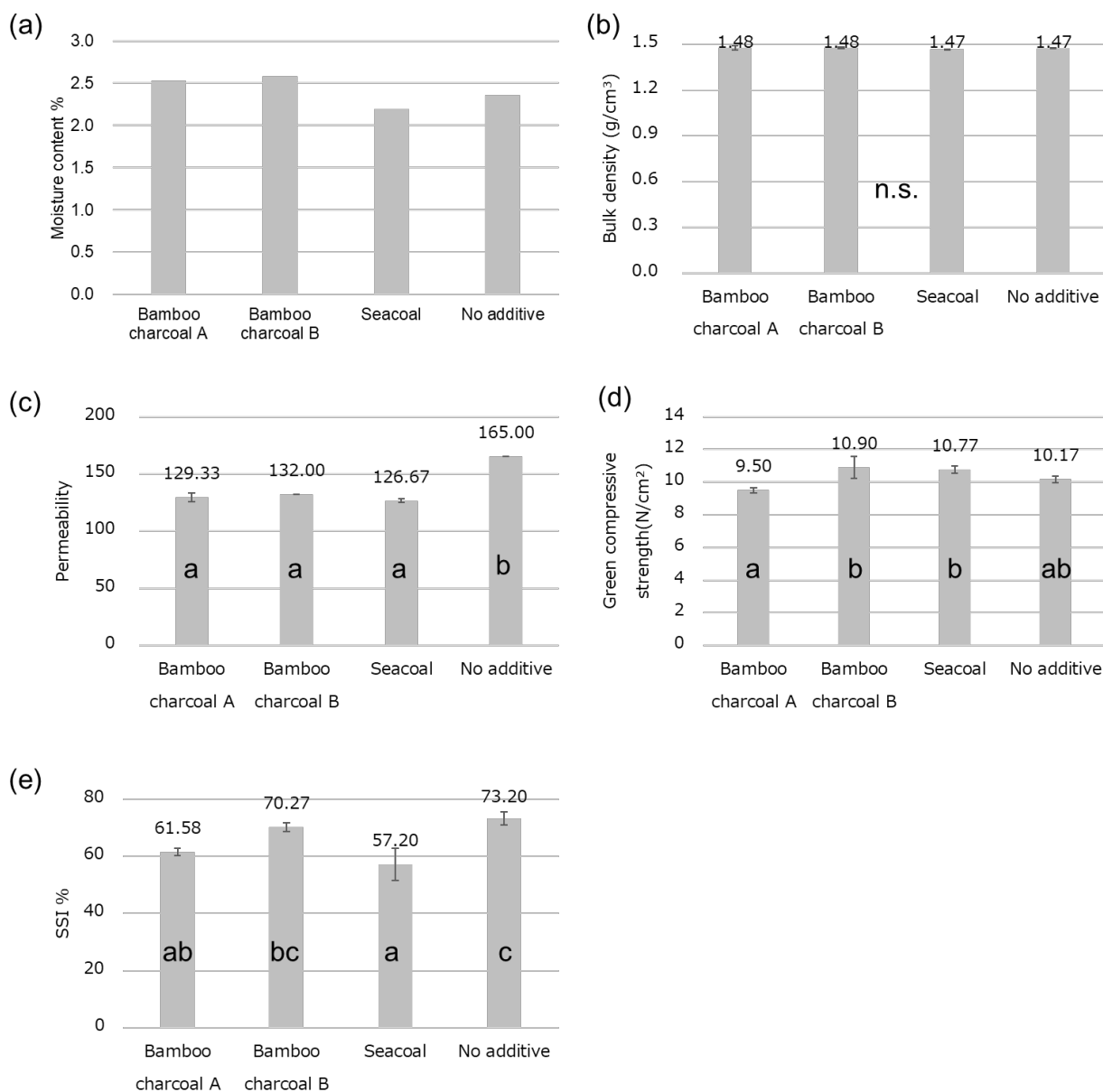


Fig. 4 Green sand properties.

(a) Moisture content, (b) Bulk density, (c) Permeability, (d) Green compressive strength, and (e) Surface stability index (SSI). Bars represent mean values ($n = 3$). Error bars indicate standard deviation. Statistical differences were analyzed using Tukey's test. Different letters indicate significant differences ($p < 0.05$), and n.s. indicates no significant difference.

造を有しており、いずれの粉碎方法においても導管や繊維構造が粉碎後も残存したことから、これらの空隙に水分が保持されやすいことがその要因の一つと考えられる。

さらに、竹炭は固定炭素分が約 85 %であり揮発分が数%程度である⁷⁾。石炭粉は鋳型表面で還元性ガスを発生させる役割を持つことから、竹炭を炭素質添加材として利用する場合には、揮発分の

不足が鋳型特性に及ぼす影響についても検討する必要がある。今後は、粒度制御に加え、揮発分の高い添加材との併用³⁻⁵⁾や炭化条件の最適化について検討することが望まれる。

4. 結論

本研究では、石炭粉の代替炭素質添加材として竹炭の利用可能性を検討するため、粉碎方法の異

なる竹炭粉を用いて生型砂試験を行い、粒度分布および粒子形状と生型砂特性との関係を調査した。その結果、以下の知見が得られた。

- ・竹炭は粉碎方法によって粒度分布が大きく変化し、SEM 観察の結果、竹材由来の導管構造が粉碎後も残存することが確認された。らいかい機で粉碎した竹炭粉 A では粗粒子が比較的多く残存したのに対し、ハンマークラッシャーで粉碎した竹炭粉 B では粒径が小さくなり、大きな導管構造の割合が減少した。

- ・生型砂特性において、湿体強度は竹炭粉 A でやや低下したが、竹炭粉 B では石炭粉と同等の値が得られた。

- ・表面安定度については、竹炭粉 A は石炭粉と同程度であったのに対し、竹炭粉 B を添加した場合には高い値が維持され、鋳型表面の安定性の観点から有利となる可能性が示された。

- ・竹炭を添加した条件では、同一 CB 値を得るために必要な水分量が増加する傾向が見られた。これは竹炭の多孔質構造に起因する水分保持によるものと考えられる。

謝辞

実験に使用した竹および竹炭は、NPO 法人桑竹会より提供いただいた。また、本研究の一部は、

一般財団法人鉄鋼環境基金の助成を受けて実施した。ここに深謝の意を示す。

参考文献

- 1) 桑名市：“桑名竹取物語”，
<https://www.city.kuwana.lg.jp/norin/kuwanataketori.html>（閲覧日：2026年3月16日）
- 2) 一般財団法人素形材センター：“新版 鋳鉄の生産技術”. p546 (2012)
- 3) 軍司義次, 井手 宏, 川崎朝光：“鋳型用炭素質添加材”. 特許第 4217756 号 (2009)
- 4) 水谷啓吾, 篠塚 拓, 曾根孝明, 森 康暢, 金森陽一, 樋尾勝也：“カーボンニュートラル材料による生型用炭素質の代替検討Ⅰ（生型特性）”. 鋳造工学 全国講演大会講演概要集 184 p68 (2024)
- 5) 森 康暢, 金森陽一, 樋尾勝也, 水谷啓吾, 篠塚 拓, 曾根孝明：“カーボンニュートラル材料による生型用炭素質の代替検討Ⅱ（鋳造品質）”. 鋳造工学 全国講演大会講演概要集 184 p69 (2024)
- 6) （公財）日本鋳造工学会生型研究部会：“生型砂試験方法”. p12-33 (2017)
- 7) 近藤義大, 森 康暢：“竹炭による鋳鉄溶湯への加炭効率”. 鋳造工学, 97 (2), p86-91 (2025)