

誘導溶解炉への材料投入時に添加した竹炭の加炭歩留まりと ねずみ鉄の成熟度に及ぼす影響

近藤義大*, 森 康暢*, 赤田英里*, 井上幸司*

Effect of Bamboo Charcoal Added when Feeding Raw Materials into the Induction Furnace
on Carbon Yield and “Reifegrad”.

Yoshihiro KONDO, Yasunobu MORI, Eri AKADA and Koji INOUE

Bamboo charcoal made from thinned bamboo is promising source of unused biomass. Toward practical application of bamboo charcoal in foundries, we examined the effect of bamboo charcoal added when raw materials into the induction furnace on carbon yield and “reifegrad” of gray cast iron. Result of experiments, carbon yield of bamboo charcoal at the time of raw materials meltdown (1300 °C), was approximately 60%. The “reifegrad” of gray cast iron carburized by bamboo charcoal was 106 %, which was larger than that of 74% for electrode graphite shavings. Furthermore, XRD results showed that the bamboo charcoal was low crystalline, it was indicated that this contributed to the improvement of the “reifegrad” of gray cast iron.

Keywords: Bamboo Charcoal, Carbonization Conditions, Carburization Efficiency, Reifegrad, Crystallinity

1. 背景

三重県北勢地区は山間部に竹林が多く分布し、タケノコは地域の特産品として全国に出荷されている。しかし、近年は竹林の所有者の高齢化等により放置竹林が増え、そこへ獣が住み着くことによる田畠への獣害が深刻化している。放置竹林対策として、桑名市のNPO法人がボランティア活動として竹林整備を行っており、間伐した竹の一部は竹炭に加工して出荷している。竹炭は主に農地への土壌改良剤として利用されているが、需要は限定的であり、間伐された竹の大半は有効利用されていないことが課題となっている。

一方、三重県北勢地区の地場産業である鋳造業において、鋳鉄溶湯への炭素源として人工的に作られた黒鉛が加炭材として大量に利用されているが、現在使われている加炭材はほぼ全て石炭また

は石油を原材料として加工されたものであり、鋳造業のカーボンニュートラル実現のためには、加炭材に植物由来材料を使用することが有効である。

そこで本研究では、地域内で持続的に調達できる炭素資源として竹炭に着目し、竹炭を鋳鉄溶湯への加炭材として利用可能かを検討した。具体的には、竹炭の製造条件が竹炭の性能に及ぼす影響を調査した。また、企業における実用化を見据え、一般的な加炭材の使い方と同様に、誘導加熱炉へ材料投入時に竹炭を添加した場合の、溶け落ち時点の加炭効率（歩留まり）および竹炭で加炭したねずみ鉄溶湯の機械的性質を調査した。さらに、加炭材としての黒鉛化度（結晶化度）を調査するため、X線回折（XRD）による結晶性の評価を行った。

2. 実験方法

* 金属研究室

2.1 竹の炭化実験

一般的に、鋳鉄用の加炭材は固定炭素分が高く、揮発分が低いほど高級とされる。竹炭の製造条件が加炭材としての基本的な性質に及ぼす影響を調査するため、竹炭の炭化温度、炭化時間が竹炭の固定炭素分、揮発分に及ぼす影響を調査した。

炭化する竹は、冬季に伐採したモウソウチクとした。竹の稈の部分を約 10 g に切り出し、炭化温度を 400 °C, 500 °C, 600 °C, 700 °C, 800 °C、炭化時間を 10 分, 20 分, 30 分, 60 分とした。炭化した竹炭は直ちに水を張ったバケツに投入することで消火、冷却し、よく乾燥させることで竹炭とし、炭化前後の質量を測定することで炭化条件ごとの収率(炭化後の質量/炭化前の質量 × 100)を測定した。各条件で炭化した竹炭の基本的性能を評価するため、JIS M 8812「石炭類及びコークス類－工業分析法」に準拠した手法で揮発分、灰分を測定し、全量からの差分として固定炭素を算出した。揮発分(VM)は可燃性成分のうち蒸発しやすい成分の割合を示し、蓋をした坩堝内で 400 °C で 7 分間、900 °C で 7 分間熱した時の質量減少分から算出した。灰分(A)は不燃性成分の割合を示し、酸素存在下において 815 °C で熱し、恒量となった時の灰の質量から算出した。固定炭素分(FC)は可燃性成分のうち固体の炭素成分の割合を示し、

$$FC = 100 - (A + VM)$$

から算出した。

2.2 溶解実験

溶解実験に使用した竹炭は、揮発分 7~8 %、固定炭素分 86~87 % の物を使用し、篩を用いて粒径を 5.6~30 mm に調整した。溶解実験は、50 kg 高周波誘導溶解炉 (3 kHz) を用いた。原材料として、銑鉄、鋼板、Fe-Si を合計 25 kg 用い、加炭材として竹炭を 375 g、溶湯重量比で 1.5 % 量を冷材投入時に添加した。この際、加炭歩留まりを向上させるため、Fig. 1 にイメージを示すように、鉄板と竹炭が交互に重なるように設置し、最上部に銑鉄を設置することで、溶解の過程で初めに銑鉄が溶けた溶湯が鉄板及び竹炭部分を滴るようにした。材料が完全に溶け落ち、1300 °C に達した時点の溶湯を、内径 2.5 mm の石英管とシリンドラを用いて約 5 g 採取し、急冷凝固させることで試料を採取し、燃焼赤外吸収法で C の定量分析をすることで、C の歩留まりを求めた。さらに、加炭実験後の溶

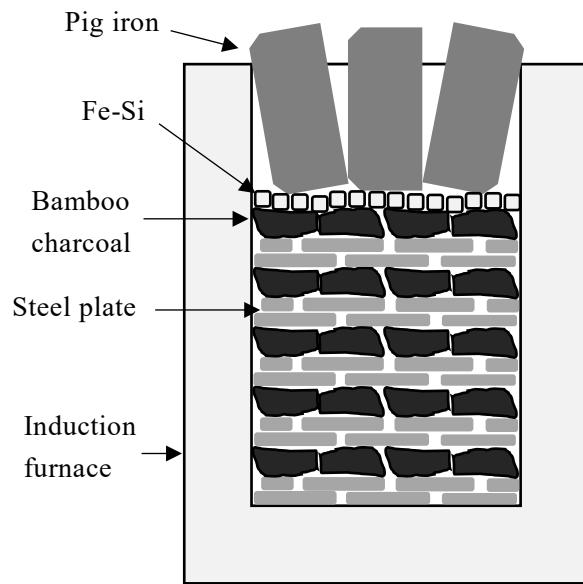


Fig. 1 The image of feeding raw materials into the induction furnace.

湯をラドルへ出湯し、0.2 % 量の接種を施したのち、JIS G 5501 8C 号丸棒試験片鋸型に鋸込み、引張試験片に加工し、引張試験を行うことで引張強度を測定した。加炭材の比較対象として、一般的な電極黒鉛屑(粒径 1.2 mm, C 純度 99.7 %)を同量使用し、同じ溶解実験を行った。

ねずみ鉄において、炭素飽和度 (S_C) が大きくなるほど引張強度は低下すること¹⁾が知られており、炭素飽和度から予想される引張強度と比べて、実際に引張試験をした材質が強いか弱いかを示す指標として成熟度 (Reifegrad, RG) が提唱されている^{2,3)}。この中で、

$$S_C = \frac{C\%}{4.26 - \frac{(Si\% + P\%)}{3.2}}$$

とし、 S_C から予測される引張強度 σ_n (N/mm²) を $\sigma_n = (102 - 82.5 \times S_C) \times 9.8$ とする。実際の引張試験によって求めた引張強度を σ_t (N/mm²) とすると、

$$RG(\%) = \frac{\sigma_t}{\sigma_n} \times 100 = \frac{\sigma_t \times 100}{(102 - 82.5 \times S_C) \times 9.8}$$

となり、RG が 100 % を上回るほど材質としては「かため」、逆に 100 % を下回るほど「やわらかめ」の材質とされる。竹炭で加炭したねずみ鉄の成熟度を測定することで、機械的性質への影響を調査した。

2.3 竹炭および電極黒鉛屑の結晶化度測定

加炭材の黒鉛化度（結晶化度）の違いは、加熱中における固体鉄への浸炭や、鉄溶湯へのCの拡散の挙動に影響し、このことは溶湯の性状や冷却時の共晶凝固に違いをもたらすと考えられている⁴⁾。今回の溶解実験で加炭材として使用した竹炭および電極黒鉛屑について、Cの歩留まりや成熟度への影響を考察するため、それぞれの結晶化度を調査した。加炭材の結晶相はX線回折(XRD, CuK α $\lambda=0.154064\text{ nm}$, UltimaIV, リガク(株)製)を用いて同定、定性分析した。

3. 実験結果

3.1 炭化条件と基本的物性

Fig. 2 a–c) に竹の炭化条件ごとの収率、固定炭素分、揮発分を示す。収率は、炭化温度が高く、炭化時間が長くなるほど低くなる傾向があったが、炭化温度700 °C以上においては炭化時間10分間でも収率は15%程度であり、この時点ではほぼ完全に炭化していると考えられる。固定炭素分、揮発分においても、炭化温度が高く、炭化時間が長くなるほど固定炭素分が高く、揮発分が低くなる傾向がみられた。固定炭素分85%，揮発分10%を良好な竹炭の目安とすると、600 °Cで20分間または700 °Cで10分間以上の炭化処理で得られることが確認された。

3.2 加炭歩留まりと成熟度

Table 1 に竹炭または電極黒鉛屑で加炭した溶湯の引張強度 σ_t 、C, Siの組成割合、成熟度(RG), 溶け落ち時点のCの歩留まりを示す。成熟度は、竹炭で加炭した溶湯は106%といわゆる「かため」の溶湯、電極黒鉛屑で加炭した溶湯は74%と「やわらかめ」の溶湯であるといえる。また、溶け落ち時点のCの歩留まりは、竹炭は59%であり、電極黒鉛屑は80%となった。すなち、冷材投入時に添加した竹炭のうち、重量比で約6割のCは、材料の全量溶け落ちまでに溶湯中へ取り込まれ、残りの4割は、後の昇温過程で溶湯面に浮遊した状態で加炭が進行するか燃焼により消失し、添加した竹炭に約6%含まれる灰分⁵⁾はノロとして除去されるものと考えられる。なお、1450 °Cに保持した溶湯面に浮遊した竹炭の加炭速度については、前報⁵⁾に記載した。

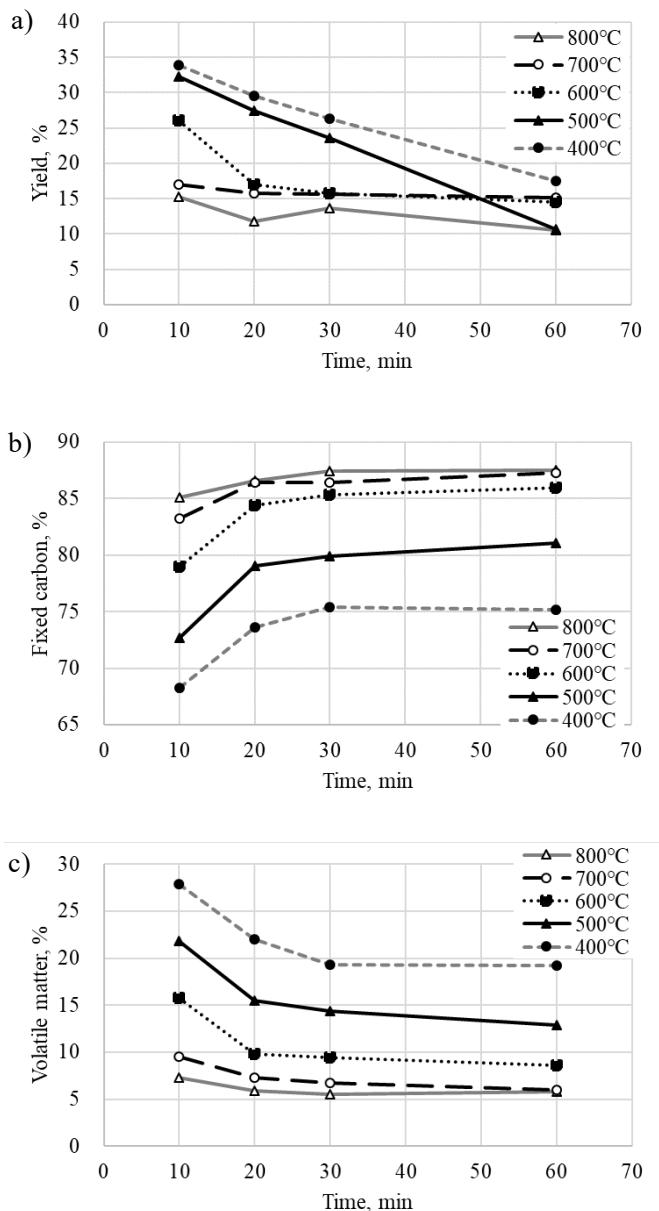


Fig. 2 Effect of bamboo carbonization temperature on
a) Yield, b) Fixed carbon, c) Volatile matter, and its
relationship with carbonization time.

Table 1 “Reifegrad” and carbon yield at the time of meltdown (1300 °C) of gray cast iron carburized by bamboo charcoal or electrode graphite shavings.

Carburizer	Bamboo	Electrode
	charcoal	graphite shavings
Tensile strength MPa	250	121
C %	3.38	3.70
Si %	2.16	2.17
Reifegrad %	106	74
Carbon yield %	58.6	79.8

3.3 竹炭および電極黒鉛屑の XRD 評価

電極黒鉛屑および竹炭の粉末 X 線回折 (XRD) により評価した XRD パターンを Fig. 3 に示す。図のとおり、電極黒鉛屑の XRD パターンの回折ピークはシャープであるが、竹炭の XRD パターンはブロードであることから、電極黒鉛屑は結晶性が高いが、竹炭は結晶性が低かった。具体的には、電極黒鉛屑の結晶が六方晶系であるのに対して、竹炭の結晶は三方晶系であった。つまり、電極黒鉛屑と竹炭の大きな差異は回折ピーク幅の大小の強弱 (= 結晶性) であることがわかった。

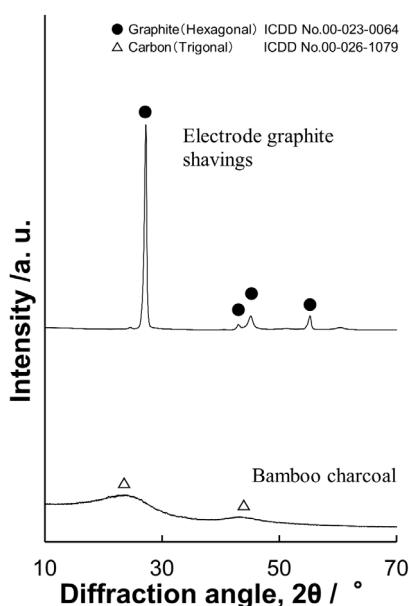


Fig. 3 XRD patterns of bamboo charcoal and electrode graphite shavings.

4. 考察

今回の実験において、黒鉛化度（結晶化度）は、竹炭において非常に低く、電極黒鉛屑は非常に高いこと (Fig. 3)，それぞれの加炭材で加炭した溶湯の成熟度は、竹炭の方が高く「かため」となり、電極黒鉛屑は低く「やわらかめ」となること (Table 1) がわかった。

黒鉛材料の結晶化度が材質へ及ぼす影響について、三宅らは詳細に報告している⁴⁾。この中で、真空中において、結晶化度が低い加炭材を電解鉄と接した状態で昇温、融解させると、固体電解鉄への浸炭は生じやすく、このため γ の固相線温度における融解が生じやすいものの、加炭材を分散・拡散した溶湯からの黒鉛共晶の核生成は困難であ

り、準安定系のレデブライト凝固が生じやすいことが示されている。また、結晶化度が高い加炭材の場合、固体電解鉄への浸炭は生じにくいため、 γ と黒鉛の共晶融解は生じやすく、加炭材から溶湯への黒鉛の分散・拡散は容易で、安定系黒鉛共晶による核生成及び成長が生じやすいことが示されている。今回の実験においては、結晶化度の低い竹炭で加炭した溶湯は、準安定系レデブライト凝固を生じやすいことでペーライトを構成するセメントタイトが多くなるため「かため」の溶湯となり、結晶化度の高い電極黒鉛屑で加炭した溶湯は、安定系黒鉛共晶により黒鉛が多く晶出したため「やわらかめ」の溶湯となったと考えられる。準安定系レデブライト凝固が生じやすい溶湯は、炭素飽和度 (S_C) から予想される引張強度よりも強くなりやすい反面、チル深さが大きくなりやすいため、薄肉部におけるチルの発生には注意する必要があると考えられる。竹炭で加炭した溶湯のチル発生傾向については、今後の検討課題とする。

5. 結論

竹炭の鋳造用加炭材としての利用可能性を検証したところ、以下の結果を得た。

- ・竹を 600 °C で 20 分間または 700 °C で 10 分間以上炭化処理することで、固定炭素分 85%，揮発分 10%程度の竹炭を得られ、この時の収率は概ね 15%程度であった。
- ・冷材投入時に竹炭を添加した場合、溶け落ち時点の C の歩留まりは 60%程度であった。
- ・竹炭で加炭した溶湯の成熟度は、電極黒鉛屑で加炭した溶湯よりも高くなった。
- ・竹炭の結晶性は極めて低く、このことが溶湯の成熟度の向上に影響した可能性が示唆された。

以上より、冷材投入時に竹炭を誘導溶解炉内に添加することで加炭材として使用でき、溶湯の成熟度の向上にも有効であると考えられる。

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。ここに深謝の意を示す。

参考文献

- 1) 一般財団法人素形材センター：“新版 鋳鉄の生産技術”. p11-14 (2012)

- 2) 加山延太朗, 阿部喜佐男, 正木幸雄：“鋳鉄における合理的な材質判定法の試み”. 鋳物, 34 (3), p169-175 (1962)
- 3) 井川克也：“球状黒鉛鋳鉄の成熟度による材質評価”. 鋳造工学, 68 (10), p883-890 (1996)
- 4) 三宅秀和, 小田廣和, 岡田 明, 横川親雄：“鋳鉄溶湯の性状に及ぼす各種炭素材の影響”.
- 5) 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)
- (本調査研究事業は、産業廃棄物税を財源としています。)