

電気炉の加熱性能がバイオコークスの製造密度に及ぼす影響

麓 隆行, 水野 諭

(近畿大学バイオコークス研究所)

【はじめに】

実用的には、大型バイオコークス製造装置で直径 100mm 程度のバイオコークスを製造する。しかし、製造条件の決定や品質評価のための実験では、直径 50mm 以下の小型バイオコークス製造装置で試験的な研究を行うこととなる。小型バイオコークス製造装置では、均一なバイオコークスが製造できると考えられるからである。しかし、製造時に使用される電気炉は、必ずしも高さ方向に一様に加熱できているわけではない。すなわち、同じ加熱方法でも、製造位置によってバイオコークスの密度が異なる可能性がある。そこで本研究では、小型バイオコークス製造装置で均一なバイオコークスを製造できる範囲を明らかにするため、一定の加熱方法で、異なる高さ位置で製造されたバイオコークスの密度と加熱炉の性能との関係を検討した。

【製造概要】

原料には、水分 10% の間伐木材チップを粒径 2.36mm でふるったものを用いた。直径 48mm、高さ 300mm の鋼製筒底から下部スペーサーを適宜挿入し、高さ位置を調整した。その後、原料 119g を投入した。その上から、上部スペーサーを挿入した。常温で、22MPa の荷重をかけて原料を締め固めた。圧力を維持したまま、電

気炉にて加熱した。まず、以降で示す制御方法で加熱後、電気炉を開閉し、所定の温度で 15 分間保持した。その後、電気炉を鋼製筒の周囲から取り外し、扇風機にて急冷した。温度が 298K となると除荷し、鋼製筒からバイオコークスを取り出した。

本研究で用いた電気炉の性能を、図 1 に示す。すなわち、電気炉の底から 136~164mm (高さ中央から ±14mm) の範囲で ±0.5K、底から 119.1~180.9mm (高さ中央から ±30.9mm) の範囲で ±2.5K、および底から 106.5~193.5mm (高さ中央から ±43.5mm) の範囲で ±5K の差が生じる。そこで、底から 106.5~193.5mm の範囲を最小二乗法により、2 次曲線として近似すると、式 (1) のように表すことができた。

$$T_f = -2.64 \times 10^{-3} X^2 + 0.793X + 1013.5 \quad \dots (1)$$

ここで、 T_f は電気炉の温度 (K)、 X は電気炉底面からの高さ (mm) である。その相関係数は $R = 1.000$ であった。電気炉を写真 2 に示す。また、バイオコークスの製造装置の油圧プレス機を写真 3 に示す。

温度制御には、図 2 に示す 3 つの熱電対を使用した。熱電対 M を鋼製筒の高さ中央に、熱電対 A および熱電対 B を上部スペーサーの断面中心に対して対称的な外縁近くで、原料上端から 3mm 上の高さ位置に設置した。写真 1 に熱電対 M、熱電対 A および熱電対 B の設置状況

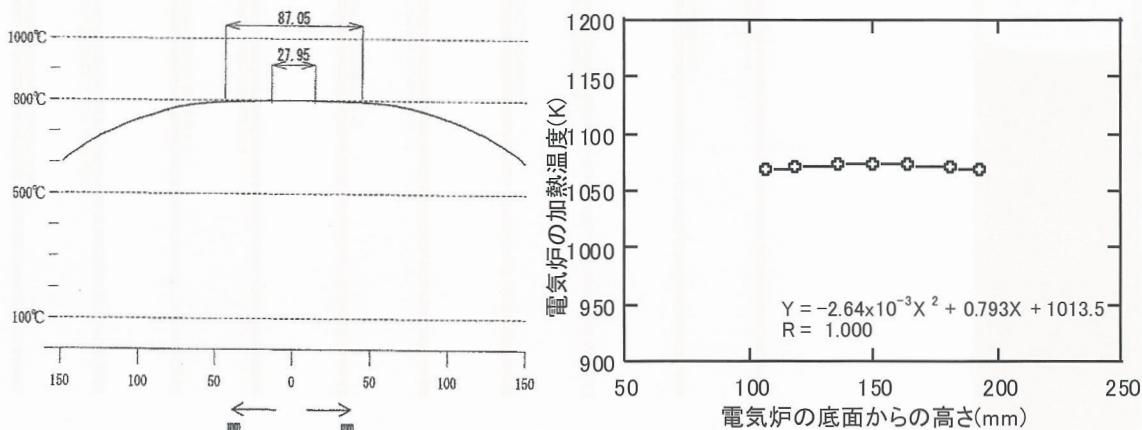


図 1 るつば断面図 (BIC : φ 48mm)



写真1 鋼製筒と熱電対 M の設置状況



写真2 使用した電気炉 (向こう側が開閉する)



写真3 油圧プレス機

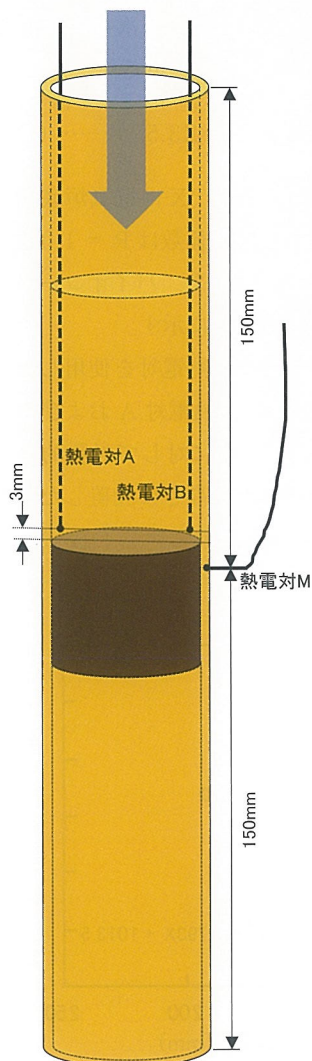


図2 鋼製筒と熱電対の位置

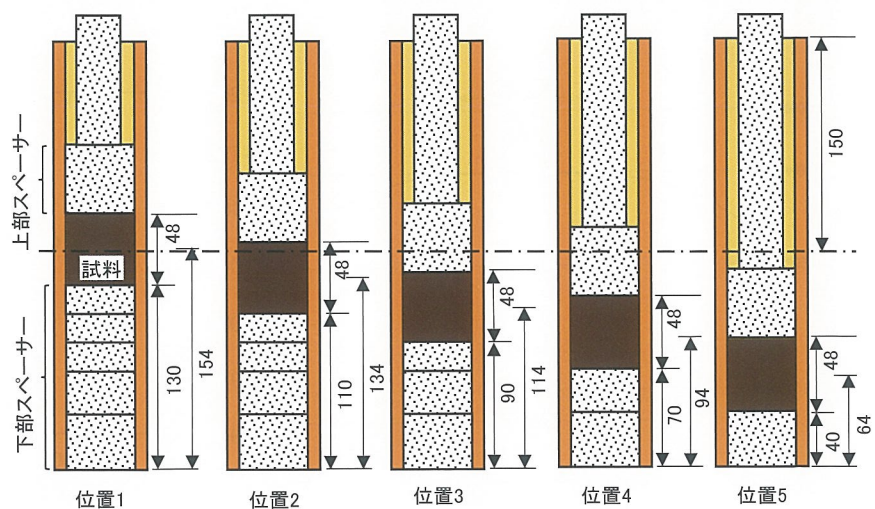


図3 スパースターの設置状況とバイオコークス製造位置 (単位: mm)

を示す。

加熱条件は、事前の予備実験の結果から、次のように決定した。電気炉からの加熱条件を一定とするため、熱電対 M を用いて温度上昇時の制御を行った。その加熱速度は約 10K/min とし、480K となるまで加熱した。その後、原料内部の温度を 15 分間一定とした。熱電対 M では電気炉に近く、内部温度とは異なるため、内部に近い熱電対 A で制御することとした。すなわち、熱電対 M で 480K に達した時点での熱電対 A の温度を記録し、その温度を保持するように、電気炉を開閉し、加熱温度の状態を 15 分間制御した。なお、電気炉の開閉した箇所に近い熱電対 B と最も遠い熱電対 A との差を確認したところ、計測された温度差は小さく、ほぼ均等に加熱されていた。

製造位置について、図 3 に示す。下部スペーサーの高さは、鋼製筒下から 130mm, 110mm, 90mm, 70mm および 40mm とした。本研究での条件 (原料 119g,

22MPa) で製造すると、高さ47.4~52.7mmのバイオコークスが製造された。すなわち、バイオコークスの高さ中央は、鋼製筒下から位置1で153.7mm、位置2で133.7mm、位置3で113.9mm、位置4で94.4mmおよび位置5で66.4mmとなった。以上から、位置1では、バイオコークスの中心は、鋼製筒の高さ中央付近であり、電気炉のほぼ高さ中央に位置すると考えられる。また、熱電対Aおよび熱電対Bの位置は、それぞれバイオコークスの上端から3mm上の位置にあるため、鋼製筒下から位置1で180.4mm、位置2で160.5mm、位置3で140.9mm、位置4で121.9mmおよび位置5で95.7mmとなった。なお、再現性の確認のため、各製造位置で、3回バイオコークスを製造した。

【実験結果】

図4に位置1で製造した際の熱電対の計測結果例を、また図5に位置3で製造した際の熱電対の計測結果例を示す。位置1では、熱電対Mが480Kに達した際に、熱電対Aおよび熱電対Bは443Kに達した。その後、熱電対Aおよび熱電対Bを安定させるため、電気炉を開閉したことにより、熱電対Mが34Kほど低下した。一方、位置3では、熱電対Mが480Kに達した際に、

熱電対Aおよび熱電対Bは461Kに達した。その後、熱電対Aおよび熱電対Bを安定させるため、電気炉を開閉したことにより、熱電対Mが11Kほど低下した。両者を比較すると、熱電対Aおよび熱電対Bで計測された温度が、位置1に比べて、位置3のほうが18K大きかった。表1に示すように、熱電対AおよびBの位置が、位置1では筒底から180.4mm、位置3では筒底から140.9mmであることから、電気炉の中心に近い位置3での熱電対Aおよび熱電対Bの温度が高くなったと考えられる。すなわち、熱電対Aおよび熱電対Bは、筒底からの各位置において、筒内部に与えられた温度を示していると考えられる。

図6に筒底からの熱電対AおよびBの位置と保持温度との関係を示す。比較のため、図2に示した1073Kに調整した電気炉の性能曲線も示した。熱電対AおよびBの温度は、上に凸のようにプロットされた。そこで、最小二乗法により、2次曲線として近似すると、式(2)のように表すことができた。

$$T_s = -0.0141 X^2 + 4.12 X + 158.5 \quad \dots (2)$$

ここで、 T_s は熱電対の温度(K)、 X は筒底からの高さ(mm)である。その相関係数は $R = 0.973$ であった。

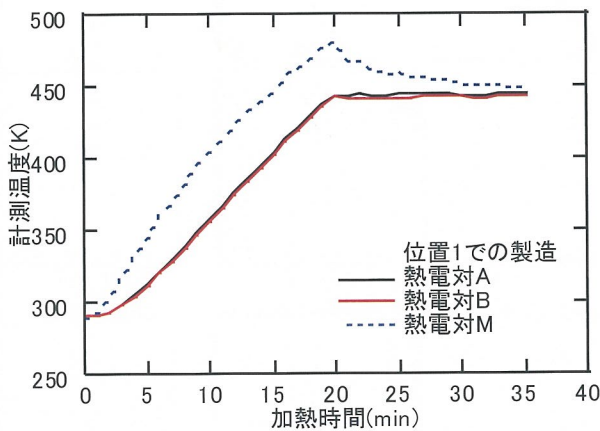


図4 位置1で製造した際の熱電対の計測結果例

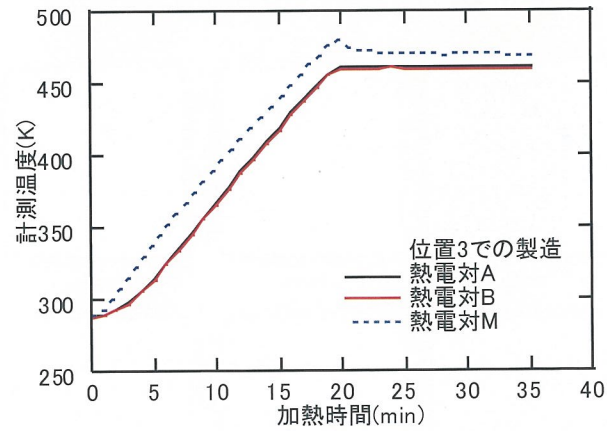


図5 位置3で製造した際の熱電対の計測結果例

表1 製造されたバイオコークス中央と熱電対AおよびBの位置

位置	下部スペーサー高さ (mm)	製造後のバイオコークス高さ (mm)	筒底からの位置 (mm)			
			BIC 下端	BIC 中央	BIC 上端	熱電対 A, B
位置1	130	47.4	130	153.7	177.4	180.4
位置2	110	47.5	110	133.7	157.5	160.5
位置3	90	47.9	90	113.9	137.9	140.9
位置4	70	48.9	70	94.4	118.9	121.9
位置5	40	52.7	40	66.4	92.7	95.7

* 熱電対AおよびBは、バイオコークス上端から3mm上の上部スペーサー内にある。

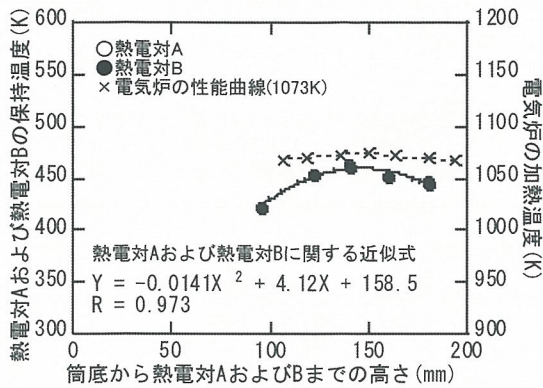


図6 熱電対 A および B の位置と温度との関係

近似式から推定される筒内の最大温度は459Kで高さ146mmの位置であった。また、筒底から高さ94mmでの筒内の温度は422Kと、筒内の最大温度から37K低かった。1072Kでの電気炉の性能曲線と比較すると、バイオコークスに与えられた温度分布の曲率が大きかった。これは、電気炉から放出された熱エネルギーが小さいほど、装置内を通過する際の減少や拡散が大きかったためだと考えられる。

写真4に、製造されたバイオコークスの外観を示す。位置1～位置3では、ほぼ同じ黒色で下部に少し黄色い箇所が見られた。一方、位置4～位置5では、筒底に近くなるほど、バイオコークスに占める黄色い範囲が大きくなり、製造後のバイオコークスの高さも大きくなった。な

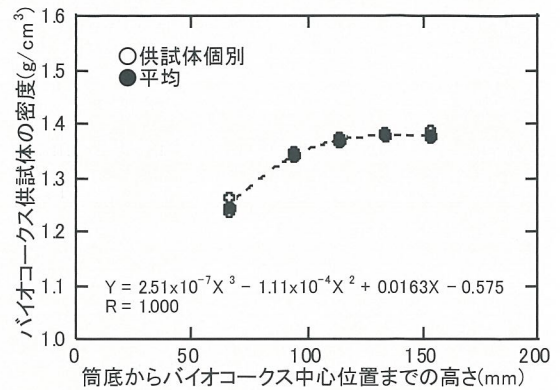


図7 バイオコークスの中心位置と密度との関係

お、製造されたバイオコークス高さは、表1に示すように、位置1～位置3では47.4～47.9mmであったが、位置4で48.9mm、位置5で52.7mmと外観の傾向と一致した。すなわち、位置4～位置5では、バイオコークス化している範囲が減少していることが考えられる。

図7に筒底からのバイオコークスの中心位置と密度との関係を示す。筒底からのバイオコークスの中心位置が、高くなるほど供試体の密度が大きくなった。そして、バイオコークスの中心位置が、銅製筒の高さ中央位置(筒底から150mm)に近づくと、密度の増加量は小さくなり、ほぼ一定となった。そこで、最小二乗法により3次曲線に近似すると、式(3)のように表すことができた。

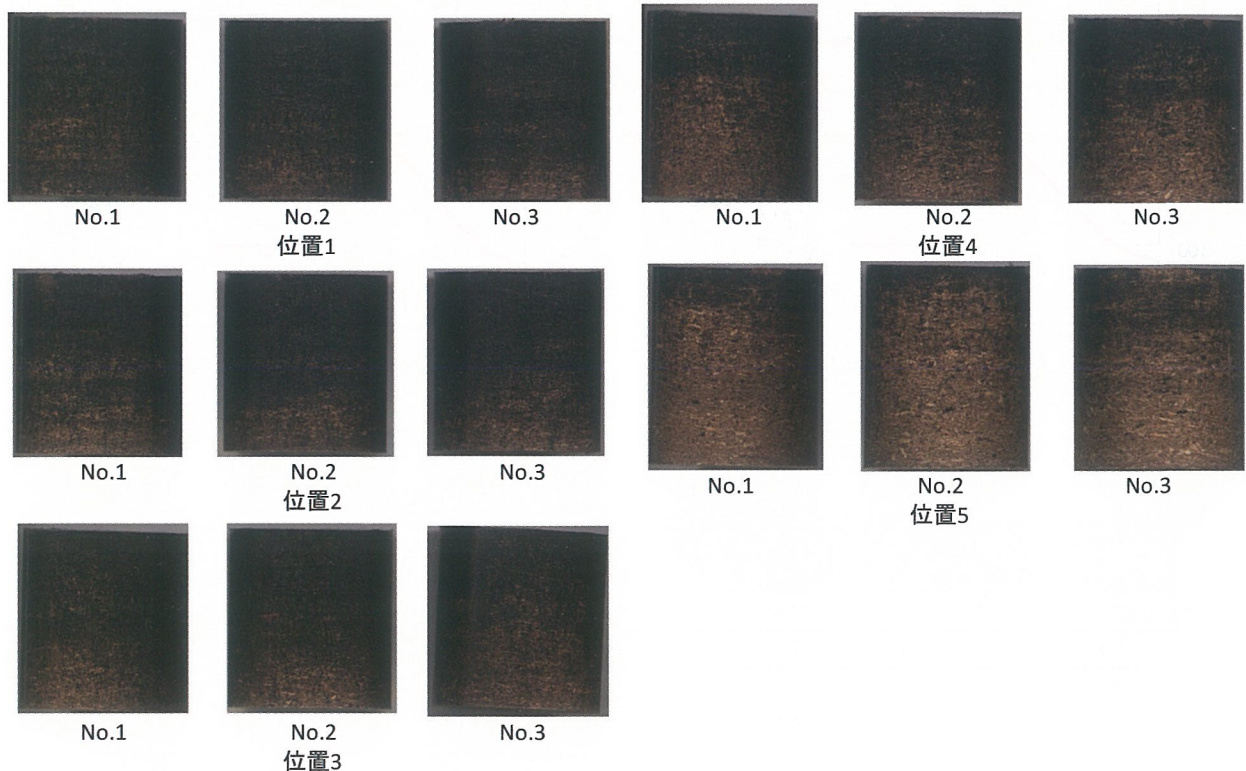


写真4 各位置で製造されたバイオコークスの外観

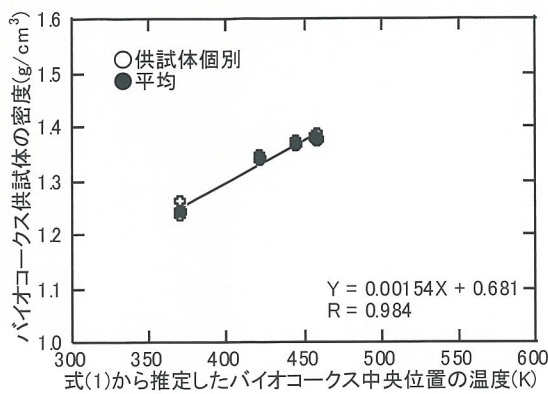


図8 式(1)から推定したバイオコークス中央位置の温度とバイオコークスの密度との関係

$$D_{BIC} = 2.51 \times 10^{-7} X^3 - 1.11 \times 10^{-4} X^2 + 0.0163 X + 0.575 \quad \dots\dots (3)$$

ここで、 D_{BIC} はバイオコークスの密度 (g/cm^3)、 X は筒底からの高さ (mm) である。その相関係数は $R = 1.000$ であった。式 (3) から、密度が $1.37 g/cm^3$ ($1.365 g/cm^3$ 以上) となる範囲を求めると、バイオコークスの中心位置は、筒底から約 $118 \sim 150 mm$ の高さとなった。すなわち、バイオコークスの下端位置が、筒底から約 $94 mm$ の高さ以上で、平均密度 $1.37 g/cm^3$ が得られると推定できた。

図8に、式 (2) から推定したバイオコークス中央位置の温度とバイオコークスの密度との関係を示す。その関係は、直線的な関係となった。そこで、最小二乗法により1次式に近似すると、式 (4) のように表すことができた。

$$D_{BIC} = 0.00154 T_s - 0.681 \quad \dots\dots (4)$$

ここで、 D_{BIC} はバイオコークスの密度 (g/cm^3)、 T_s は熱電対 A の温度 (K) である。その相関係数は $R = 0.984$ であった。すなわち、直線関係にあり、本研究の範囲では、筒内の温度が製造されたバイオコークスの密度に影響を及ぼしたことが明らかとなった。

以上から、図7の式 (3) より、バイオコークスの密度が $1.37 g/cm^3$ ($1.365 g/cm^3$ 以上) となる範囲は、筒底から約 $94 \sim 150 mm$ の高さであった。その範囲では、図6の式 (2) より、筒内温度範囲は $422 \sim 459 K$ であった。図2の式 (1) より、この高さ範囲での電気炉の最高温度との温度差は約 $8 K$ であった。電気炉は、高さ中央からの温度分布が上下対称であることから、本研究で用いた原料では、電気炉の温度差が $8 K$ となる高さ $94 \sim 206 mm$ (電気炉の高さの中心から $\pm 56 mm$)、すなわち $112 mm$ の範囲で製造可能であることいえる。

【まとめ】

バイオコークスの製造条件を、直径 $48 mm$ 、高さ $300 mm$ の鋼製筒で、水分 10% の粒径 $2.36 mm$ 以下の間伐木材チップ $119 g$ を用いて、圧力 $15 MPa$ 、筒内温度 $459 K$ 程度、保持時間 15 分として実験を実施した。その結果、バイオコークス化された供試体の密度 $1.37 g/cm^3$ が得られる電気炉の高さの中心から $\pm 56 mm$ で、電気炉の温度を約 $\pm 8 K$ で制御できる範囲であることがわかった。

【謝辞】

実験を行うにあたり、バイオコークスの製造で、村上和宏様に多くのご助力を頂きました。ここに、謝意を表します。