

炭化物の燃焼特性の簡便評価法について[†]

岡本裕行¹・井上雅夫²・山本秀樹³・芝田隼次^{3††}

¹アサヒビール(株) 未来技術研究所, 302-0106 守谷市緑 1-1-21

²新日本空調(株), 103-0021 中央区日本橋本石町 4-4-20

³関西大学工学部 化学工学科, 564-8680 吹田市山手町 3-3-35

ビール粕, おがくず等の有機性原料を固形化して焼成した炭, あるいは木炭の燃焼特性を把握するために2種類の装置を開発した。燃焼速度測定装置は, 一定条件下で炭を燃焼させながら被燃焼物の質量の経時変化を測定することにより, 火持ちを数値化するものである。一方, 燃焼ガス温度測定装置は, 一定条件下で炭を燃焼させながら通気空気の出口气体の温度の経時変化を測定することにより, 火持ちを数値化するものである。高含水率のビール粕(脱水後 67 wt%)を乾燥させ, 加熱しながら高圧で圧縮して成形品を作成し, これを低酸素雰囲気下で焼成することにより得た炭化物(ビール粕成形炭)と市販のオガ炭, 備長炭について, これらの装置でその燃焼特性を評価した。いずれの装置で評価しても, 火持ちは備長炭が最も長く, ついでビール粕成形炭とオガ炭は同等であるという結果を得て, これらの燃焼特性評価装置が実用に供せる可能性を示した。

緒 言

木炭には, 備長炭に代表される白炭, 池田炭に代表される黒炭, おがくずを成形後炭化したオガ炭等があり, それぞれの炭の品質は日本農林規格に定められている。日本農林規格による炭の品質評価では, 硬度と長さによって分類されている。備長炭のようにばめがしを原木とする炭あるいは高温で焼いた炭は, 固く比重が大きい。燃料に使用される木炭は, 継続して燃焼する長さが異なる。これを評価するパラメータはなく, 従来「火持ち」という言葉で表現されてきた。着火して連続して燃焼する時間が長ければ長いほど「火持ちが良い」と言われる。比重の大きい炭は火持ちが良く, 一般的に品質は良いとされる。そのため, 炭の品質を評価する一指標として炭の硬さ(硬度)を使用する方法が考案されている。さまざまな炭の硬度測定の結果については, Miura (1918) が報告している。

硬度以外に炭の品質を評価する方法として精練度がある。精練度とは木炭の電気抵抗を測定し, 木炭の炭化の程度を評価する方法で, Kishimoto らによって考案されたものである(Kishimoto and Furutani, 1952)。

ビール醸造工程の仕込工程から発生する麦汁抽出後の残渣は通常, ビール粕と呼ばれ, これを乾燥させた後成形し, 低酸素雰囲気下で加熱焼成するとビール粕成形炭を得ることができる。ビール粕の主な成分はセルロース, ヘルセミロース, タンパク質などである。得られたビール粕成形炭の燃料としての品質を評価するためには, 木炭と比べて火持ちが良いのか悪いのかを数値化する必要がある。

そこで, 本研究では炭化物の燃焼特性を把握するために2種類の装置を開発し, ビール粕成形炭, 備長炭, オガ炭の燃焼特性を評価することを試みた。燃焼速度測定装置は, 一定条件下で炭を燃焼させながら質量の経時変化を測定することにより, 火持ちを数値化しようとするものである。一方, 燃焼ガス温度測定装置は,

一定条件下で炭を燃焼させながら通気ガスの排気温度を連続的に測定することにより, 同様に火持ちを数値化しようとするものである。ビール粕成形炭, オガ炭および備長炭について, これらの装置で火持ちを評価した。

1. 従来の木炭評価方法について

ビール粕成形炭の品質を評価する装置を開発するにあたって, 従来, 木炭の品質がどのように評価されてきたかを調査した。その結果, 硬度と精練度という基準が使われてきたことがわかった。

硬度の測定方法とは, 鉛その他の金属を混合してつくった合金の金属片の先端を刃物状に削り, その金属片先端で木炭の断面を引っ掻き, 引っ掻き傷がつくか, つかないかで硬度を決める評価方法である。日本農林規格では, 備長炭は硬度 15 以上であることが規定されている(Kishimoto, 1998)。

精練度とは, 炭素の量が多いほど電気抵抗が低くなる性質を利用して, 炭の電気抵抗を測定することにより木炭の炭化の程度を測定する方法である。

実際に炭を燃焼させた場合, 炭の種類により, 燃焼する速さに違いがあり, 「火持ちが良い」あるいは「火持ちが悪い」という表現が用いられてきた。一般的に備長炭などの白炭は着火が難しいが火持ちが良く, 池田炭などの黒炭は着火しやすいが火持ちが悪いといわれている。この「火持ち」とは, 炭がどれくらい長い間燃えているかを表現した言葉である。固形燃料の燃焼については, 発熱量測定, 着火温度測定他に, 熱重量分析(TG), 微分熱重量分析(DTG)や示差熱分析(DTA)などがある。

しかし, 木炭等小規模で用いられる固形燃料について, 実際の使用条件に近い雰囲気において, どのくらい長い間燃えているかを客観的に数値評価した例はなく, 「火持ちが良い」「火持ちが悪い」といった言葉も, 単に経験的に用いられているにすぎない。ここにこの研究の必要性がある。

2. 燃焼速度測定装置の開発

2.1 装置の試作

燃焼特性を評価するために, 炭を使用するのに近い条件で燃焼

[†] 2002年8月20日受理

^{††} shibata@kansai-u.ac.jp

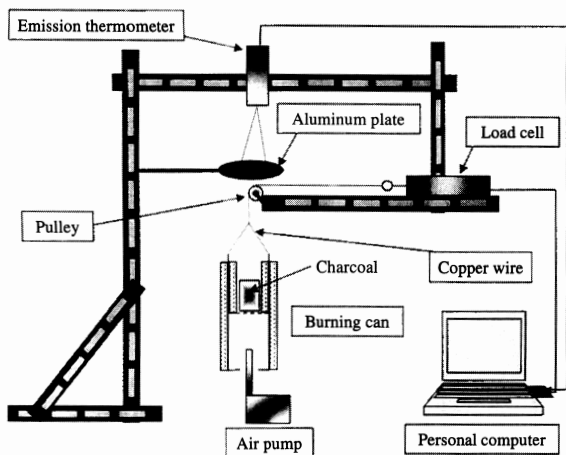


Fig. 1 Experimental apparatus for burning rate analysis of charcoal

させ、その時の質量経時変化を測定して、質量が半分に減じるまでの時間である半減期 (T_{50})、質量の70%が失われるまでの時間である70%減期 (T_{70}) および質量の90%が失われるまでの時間である90%減期 (T_{90}) をもって比較することを試みた。質量の減少速度によって燃焼している時間の長さが評価でき、それらの比によって燃焼速度の経時変化を評価できると考えられる。

燃焼速度測定装置は Fig. 1 のような構造である。本装置は、試料炭を燃焼させる燃焼缶、燃焼缶に一定量の空気を送り込むポンプ、燃焼中の試料炭の重量変化を測定する重量計、燃焼中の温度を測定する温度計からなっている。試料炭を燃焼させるための燃焼缶は、中に炭を入れて計量しながら燃焼させる必要上、軽量化しなければ精度が落ちる可能性がある。そこで、清涼飲料の350 cm³ スチール製缶 (φ55 mm) を2個利用して燃焼缶を作成した。スチール缶の缶蓋を除去し、事前に缶を加熱して缶内面塗料を蒸発させた後、一方の缶にはφ7 mmのエアー導入口を1ヶ所空け、もう一方の缶には約φ2 mmのエアー導入口を均等に12個空けた。前者を上、後者を下にしてステンステープで緊結し、周囲を軽量なガラス繊維製断熱材 (ガラス角打パッキン、(株)アスク) で巻いた。缶の内面にも同様にガラス繊維製断熱材を張り、炭の燃焼熱が放散しにくい構造として、試料炭が燃焼中に立ち消えを起こすことを防いだ。缶の上部の燃焼缶に着火した試料炭を入れ、缶の下部にはダイヤフラム式の定量エアーポンプ ((株)ケー・エヌ・エフ・ジャパン, N86 K-18) からエアー配管を差し込んだ。エアー配管の先端はガラス管 (φ6.7 mm) を用い、燃焼缶から発する熱に耐えると同時に、質量減少に伴う燃焼缶の動きに応じてエアー配管先端部がスライドできるようにした。燃焼缶はステンレス製滑車を支点に極細銅線でつり下げられ、重量計 (フォースゲージ AD-4937-5 N, (株)エー・アンド・ディー) に連結されている。燃焼缶上端部から200 mmの位置に放射率0.94になるよう塗装を施したアルミ製円盤 (φ94 mm) を配置し、さらに上部から放射温度計 (IT 2-80, (株)キーエンス) で円盤の裏面の温度を測定できるように配置した。フォースゲージおよび放射温度計は、いずれも測定データを電圧出力できる端子を備えており、パソコン用データ収集装置 (NR-110, (株)キーエンス) を介してパソコンに取り込むようにした。データの収集周期は60秒とした。装置全体はアングルで組み立てた箱の中に入れ周囲をアルミ箔で巻き、風の影響で燃焼缶がふらつくことの無いよう配慮した。

2.2 測定方法

本装置を使用して燃焼特性を評価した炭は、ビール粕成形炭 (原

Table 1 Proximate analysis of charcoals [wt %]

Property	Beer lees + Ca(OH) ₂ charcoal	Oga-tan	Bincho-tan
Ash content	15.5	2.1	6.8
Volatile matter	10.3	9.9	8.8
Fixed carbon	71.8	81.5	82.0

料の乾燥ビール粕に対して消石灰を2.5 wt% 添加) 備長炭 (南部川村森林組合)、オガ炭 (サンホワイト太陽炭 (株)) の3種である。ビール粕には約12%の灰分が含まれているため、ビール粕100%で製造したビール粕成形炭は着火しにくく燃料として適さない。そこで、ビール粕成形炭を製造する際の成形工程において消石灰を2.5 wt% 添加して燃料として使用可能にしている。筆者らは、消石灰を添加することにより灰分量はさらに増加するものの比表面積が増加するために燃焼性が向上することを明らかにしている (Sato *et al.*, 2001)。また、炭化物中のアルカリ金属やアルカリ土類金属化合物の存在は炭素のガス化および燃焼の触媒として作用することが知られている (Lee and Kim, 1995; Perez-Florondo *et al.*, 1993)。それぞれの試料炭の物性を Table 1 に示す。表中のそれぞれの成分合計が100 wt%にならないのは、各物性が独立した装置で測定され、全く同じ試料炭で測定できないために生じたものである。試料炭を40 gの大きさに切り分け、真空乾燥機 (SVD-13 S, (株)いすゞ製作所) 内で0~0.02 MPa × 110°C × 24 hの条件で乾燥させ、試料炭に吸着している水分などの物質を離脱させた。これをデシケーター内で放冷後使用した。試料炭の直径と長さはともに約30-40 mmであった。試料炭を携帯用ガスコンロ上で火熾し器を使って着火し、着火面を下に向けて燃焼缶に投入した。それぞれの炭の着火性を考慮して火熾し器の使用条件を変更し、確実に着火する最小時間だけ加熱した。いずれの場合も着火を促進するために、清涼飲料の350 cm³ スチール製缶 (φ55 mm) の蓋と底を除去し、内外面にガラス繊維製断熱材を巻きつけて作成した筒をかぶせ、その上に火熾し器の蓋を載せて加熱を開始するようにした。着火しにくいビール粕成形炭の場合は火熾し器の蓋を載せて13分間加熱後に蓋を取って2分間加熱することとし、備長炭とオガ炭の場合は火熾し器の蓋を載せて5分間加熱後に蓋を取って2分間加熱することとした。燃焼缶に試料炭を投入後、速やかにこれを重量計に懸垂するとともにエアーポンプを起動させて、温度と質量の経時変化を測定した。測定の完了は、放射温度計の表示が室温と変わらなくなる時点とした。採取したデータは、重量減少率としてグラフ化するとともに、回帰式を算出した。回帰式から、 T_{50} と T_{70} 、 T_{90} を計算して、燃焼特性の指標とした。

質量の検出方法について以下に説明する。重量計はその負荷に正比例した出力信号を出すように設計されているため、算出式は出力信号を x 、質量を y とし、つぎのように表すことができる。

$$y = ax + b \quad (1)$$

測定開始時の質量と出力信号をそれぞれ w_1 、 V_1 、測定終了時の質量と出力信号をそれぞれ w_2 、 V_2 で表すと、次式が得られる。

$$a = (w_1 - w_2) / (V_1 - V_2) \quad (2)$$

$$b = w_1 - \{ V_1 (w_1 - w_2) / (V_1 - V_2) \} \quad (3)$$

a と b を測定の都度計算し、質量 y を算出した。

2.3 測定結果と考察

試料炭は質量40 gのものを出発物質としており、これを真空乾

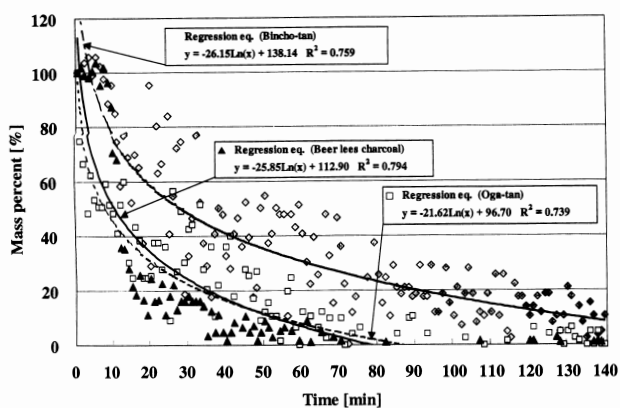


Fig. 2 Mass reduction of charcoals in burning rate analysis as a function of time

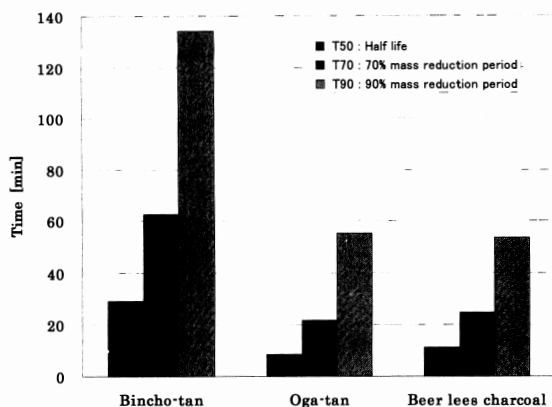
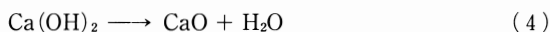


Fig. 3 Half life T_{50} , mass reduction period T_{70} and T_{90} in burning of various charcoals

燥によって水分等の吸着物質を除去しているの、その質量は 36.9–39.7 g の範囲であった。ビール粕成形炭、備長炭、オガ炭について各 2 回ずつ測定を行い、その結果を質量減少率経時変化として Fig. 2 に表した。

ビール粕成形炭には消石灰が含まれており、燃焼に伴う反応が起るため消石灰そのものも減量することが考えられる。



上記の式から計算すると、添加した消石灰の質量分の約 24.3 wt% が水蒸気として揮発する。ビール粕成形炭を炭化した際の収率は約 30%、消石灰はビール粕原料の 2.5 wt% 分添加していることから、ビール粕成形炭の消石灰含量は約 8.3 wt% と推定される。従って、ビール粕成形炭を燃焼させた際の含有消石灰の水分減量は 2.0 wt% 程度と考えられるので、ビール粕成形炭中の消石灰が熱分解して減量する質量については無視した。

Fig. 2 からビール粕成形炭とオガ炭との間には顕著な燃焼特性の差は見られないことがわかる。ビール粕成形炭やオガ炭と比較して備長炭の燃焼特性は明らかに優れている。Fig. 2 に示される質量減少率の経時変化について回帰式を算出したところ、いずれの場合も対数曲線近似において、高い相関(相関係数 $R^2 > 0.73$) を持つ回帰式が得られた。回帰式算出にあたっては、2 次関数近似や 3 次関数近似も行ってみたが、相関係数が最も大きかったのは対数関数近似であった。

質量が半減するまでの時間である半減期 T_{50} と質量が 30% に減るまでの時間である 70% 減期 T_{70} および質量が 10% に減るまでの時間である 90% 減期 T_{90} を計算した結果を Fig. 3 に示す。 T_{50} と T_{70} の計算には、Fig. 2 に示した回帰式を用いた。Fig.

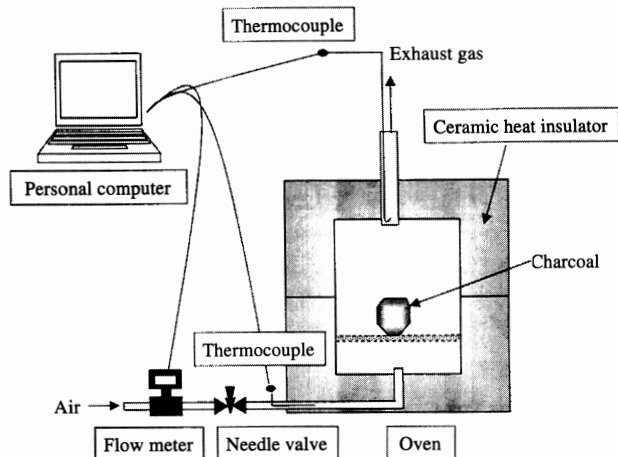


Fig. 4 Experimental apparatus for burning temperature analysis of charcoal

3 から明らかなように、ビール粕成形炭はオガ炭と同程度の半減期と 70% 減期、90% 減期を持つこと、備長炭はビール粕成形炭やオガ炭の約 2.4–3.3 倍の半減期と 70% 減期、90% 減期を持つことがわかる。

これらの結果から、試作した燃焼速度測定装置は半減期や 70% 減期、90% 減期を用いて数値化して、炭の燃焼特性を定量化できる装置であると考えられる。

3. 燃焼ガス温度測定装置の開発

3.1 装置の試作

燃焼特性を評価するもう 1 つの方法として、炭を使用するのに近い条件で燃焼させ、温度の経時変化を測定して燃えつきまでの時間をもって比較することを試みた。燃焼ガス温度測定装置は Fig. 4 に示されている構造である。本装置は、試料炭を燃焼させる燃焼炉、燃焼炉に一定量の空気を送り込むポンプおよび配管、空気流量を測定するための流量計、装置入口空気の温度および出口ガスの温度を測定するための熱電対からなっている。試料炭を燃焼させるための燃焼炉は、できるだけ放熱を抑え炭の立ち消えを防止できるように、市販のブリキ缶 ($\phi 160$ mm) の内面にガラス繊維製断熱材を厚さ 50 mm で缶の内面に貼り付け、缶の中央部で試料炭を燃焼させた。缶の内部には市販のステンレス製皿を配置して、試料炭はこの上で燃焼させるようにした。空気はコンプレッサーから常に $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$ で送気されるよう調整して、空気導入配管にはガス流量計 (CMG-250, (株) 山武) とニードルバルブを取り付けた。空気導入部と燃焼ガス出口にはそれぞれ熱電対 (T 91-2000 B 2 K 9 C 1/450, (株) 岡崎製作所) を配置した。流量計と熱電対の出力はパソコン用データ収集装置を介してパソコンに接続され、データを取り込めるようにした。データの収集周期は 60 秒とした。

3.2 測定方法

本装置を使用して燃焼特性を評価した炭は、ビール粕成形炭(原料の乾燥ビール粕に対して消石灰を 2.5 wt% 添加)、備長炭、オガ炭の 3 種である。試料炭の前処理は前項 2.2 で示した方法と同様である。デジタル自動温調電気炉 (ATORO・380 W, 城田電気炉材 (株)) を用いて、電気炉の炉内温度が設定温度 999°C に達した後、試料炭を入れて 30 分間加熱した。電気炉はほぼ密閉状態であり、加熱中には空気に暴露されず、試料炭を燃焼させずに加熱することができる。

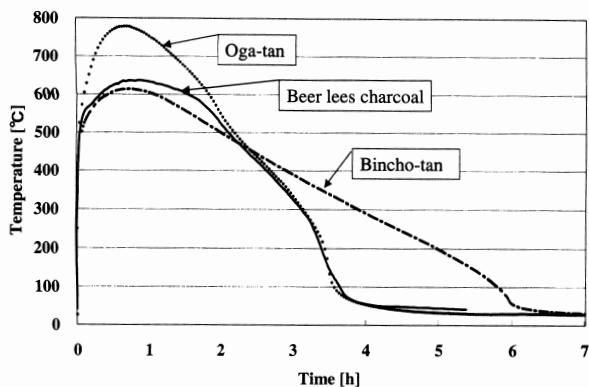


Fig. 5 Temperature change in exhaust gas as a function of time

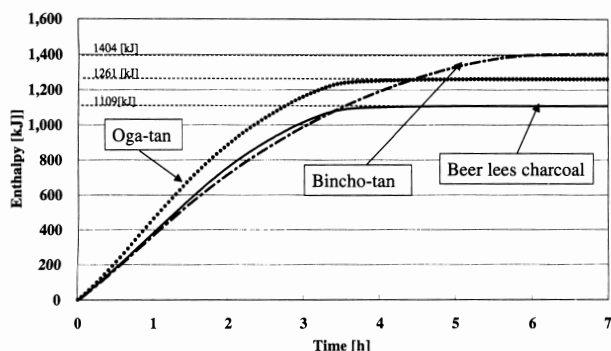


Fig. 6 Enthalpy change in exhaust gas as a function of time

試料炭を30分加熱後に、素早く燃焼炉の目皿中央部に置き、蓋をすするとともにパソコンへのデータ取り込みを開始した。測定は入口エアと出口ガスの温度が変わらなくなる時点をもって完了することとした。

3.3 測定結果と考察

燃焼ガス温度測定装置による測定結果は Fig. 5 に示されている。図には、出口ガス温度の変化が時間の関数として表されている。ビール粕成形炭の燃焼時間はオガ炭と近いが、ピーク時の温度はオガ炭よりも低いことがわかる。備長炭はビール粕成形炭やオガ炭に比べてピーク時の温度は低いが、燃焼時間が長い。出口ガス温度が常温になるまでの炭の燃焼時間は、ビール粕成形炭とオガ炭が約5時間、備長炭が約6.5時間であり、燃焼温度の測定が炭の燃焼特性の良否と関係づけられることが理解できる。

燃焼ガス温度測定装置内で試料炭がその燃焼によってエアに与えた熱量 Q を考えると、熱量 Q は次のように計算できる。

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} (\lambda/\gamma \times q) dt = (t_2 - t_1) \lambda/\gamma \times q$$

ここで、 t_1 は入口エア温度 [°C]、 t_2 は出口ガス温度 [°C] である。また、 λ は空気比熱 [kJ/(kg·°C)]、 γ は空気比容積 [m³/kg]、 q は供給エア量 [m³/h] である。空気比熱 λ および空気比容積 γ は 0°C から 700°C までの平均値として、それぞれ 1.005 [kJ/(kg·°C)] および 0.83 [m³/kg] とした。

それぞれの試料炭について、試料炭が燃焼することによってエアに与えた熱量を計算した結果を Fig. 6 に示す。ここで示した熱量は測定開始から各時間までの発熱量の値である。熱量計算の結果から、備長炭はオガ炭と比較して出口ガス温度が高温にはならないが、発熱量としては最も大きいことがわかる。発熱量の大きさの順番は、備長炭、オガ炭、ビール粕成形炭であった。Fig. 5 でビール粕成形炭とオガ炭とは出口ガス温度の経時変化が類似した形状をしているにもかかわらず、熱量計算で両者に大きい差が

生じるのは、オガ炭の燃焼初期の温度が高いことによるものである。ビール粕成形炭を消石灰無添加で試作した場合は、高い発熱量が測定され、備長炭とほぼ同じ発熱量であるという結果を得ている。今回の試験で使用したビール粕成形炭は着火性を改善するために原料の乾燥ビール粕に対して消石灰を 2.5 wt% 添加したものであったが、消石灰の添加が灰分の増加となって発熱量を下げる結果につながったと考えられる。

開発した燃焼ガス温度測定装置は、燃焼炉出口ガスの温度の経時変化を測ることによって、炭の燃焼特性を定量的に評価できる方法であると考えられる。

結 言

炭を燃料として使用した場合の「火持ち」を定量的に評価する方法を開発するために、2種類の装置、燃焼速度測定装置と燃焼ガス温度測定装置を試作し、ビール粕成形炭、備長炭、オガ炭について燃焼特性を評価した。得られた結果を要約すると、次の通りである。

- 1) 燃焼速度測定装置および燃焼ガス温度測定装置のいずれを使用した場合も、燃焼特性は備長炭>オガ炭=ビール粕成形炭(原料の乾燥ビール粕に対して消石灰を 2.5 wt% 添加)の順で良かった。
- 2) 燃焼ガス温度測定装置から評価されるように、総発熱量は備長炭>オガ炭>ビール粕成形炭(原料の乾燥ビール粕に対して消石灰を 2.5 wt% 添加)であった。
- 3) 試作した燃焼速度測定装置は、半減期や 70% 減期および 90% 減期を用いて数値化して、炭の燃焼特性を定量化できる装置である。
- 4) 試作した燃焼ガス温度測定装置は、燃焼炉出口ガスの温度の経時変化を測ることによって、炭の燃焼特性を定量的に評価できる装置である。

Nomenclature

a	= inclination	[—]
b	= intersection	[—]
Q	= enthalpy of exhaust gas	[J]
q	= amount of air	[m ³ /h]
R	= correlation coefficient	[—]
T_{50}	= half period	[min]
T_{70}	= 70% mass reduction period	[min]
T_{90}	= 90% mass reduction period	[min]
t_1	= temperature of inlet air	[°C]
t_2	= temperature of exhaust gas	[°C]
V_1	= output from load cell at initial point	[V]
V_2	= output from load cell at final point	[V]
W_0	= mass of charcoal before burning	[g]
w_1	= mass of burning can and charcoal at initial point	[g]
w_2	= mass of burning can and charcoal at final point	[g]
x	= output from load cell	[V]
y	= mass of burning can and charcoal	[g]
λ	= heat capacity of air, 1.005	[kJ/(kg·°C)]
γ	= specific volume of air, 0.83	[m ³ /kg]

Literature cited

- Kishimoto, S.; "Bincho-tan no Shurui," *Sumi*, 1, 58-59 (1998)
 Kishimoto, S. and T. Furutani; "Mokutan no Seirendo no Ketteihou," *Tokkyo-Kouhou Shou-27-3750*, 1-2 (1952)

Lee, W. D. and S. D. Kim; "Catalytic Activity of Alkali and Transition Metal Salt Mixtures for Steam-Char Gasification," *Fuel*, **40**, 1387-1393 (1995)

Miura, I.; "Mokutan no Koudo oyobi 12 Seishitu no Kenkyu," *Dai Nippon Sanrin Kaihou*, **433**, 9-28 (1918)

Perez-Florindo, A., D. Cazorla-Amoros and A. Linares-Solano; "CO₂

-Carbon Gasification Catalyzed by Alkaline-Earths: Comparative Study of the Metal-carbon Interaction and of the Specific Activity," *Carbon*, **31**, 493-500 (1993)

Satoh, K., N. Yagi, H. Okamoto, M. Inoue, M. Ajiri and J. Shibata.; "Physical Property and Burning Property of Spent Grain Charcoal," *Shigen-to-Sozai*, **117**, 587-590 (2001)

Evaluation Method for Burning Characteristics of Charcoal

HIROYUKI OKAMOTO¹, MASAO INOUE², HIDEKI YAMAMOTO³
and JUNJI SHIBATA³

¹*Fundamental Reseach Laboratory, Asahi Breweries Ltd., Moriya 302-0106*

²*Shin Nippon Air Technologies Co., Ltd., Tokyo 103-0021*

³*Department of Chemical Engineering, Kansai University, Suita 564-8680*

Key words: beer lees, charcoal, burning rate, mass reduction rate.

Two analyzers were developed to evaluate the burning characteristics of charcoal. The burning rate analyzer measures the mass reduction rate of charcoals burning in a constant atmosphere; and the burning gas temperature analyzer measures the temperature change of burning charcoals in a constant atmosphere. In this study, the burning characteristics of beer lees charcoal, produced by successively drying, pressing under heating and carbonizing beer lees in a low oxygen atmosphere, were compared with those of two commercially available charcoals, Bincho-tan and Oga-tan, by using the two newly developed analyzers. The burning rate of Bincho-tan was found to be the slowest, while those of the beer lees charcoal and Oga-tan were similar to each other. The results showed the potential of the developed apparatuses for use in evaluating charcoal characteristics.

~~~~~