

# 広葉樹ペレットの半炭化における化学成分組成の変化

中村 智彦<sup>1</sup>, 野田 雄都<sup>2</sup>, 池田 志保<sup>3</sup>, 吉田 拓也<sup>3</sup>, 野中 寛<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> 三重大学生物資源学部

<sup>2</sup> 三重大学大学院生物資源学研究科

<sup>3</sup> 株式会社神戸製鋼所 技術開発本部 機械研究所 化学技術研究室

## Change of Chemical Composition in Torrefaction of Hardwood Pellet

Tomohiko NAKAMURA<sup>1</sup>, Yuto NODA<sup>2</sup>, Shiho IKEDA<sup>3</sup>, Takuya YOSHIDA<sup>3</sup> and Hiroshi NONAKA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Bioresources, Mie University, 1577 Kurimamachiya-cho, Tsu, Mie 514-8507, Japan

<sup>2</sup> Graduate School of Bioresources, Mie University, 1577 Kurimamachiya-cho, Tsu, Mie 514-8507, Japan

<sup>3</sup> Chemical Technology Research Section, Mechanical Engineering Research Laboratory, Technical Development Group, KOBE STEEL, LTD., Takatsukadai, Nishi-ku, Kobe, Hyogo, 651-2271

### Abstract

Co-combustion with wood has been proposed to reduce carbon dioxide emissions from coal-fired power generation. Torrefaction is attracting attention as a technique for converting wood into fuel suitable for co-firing power generation. Torrefaction is a thermal reaction in an inert atmosphere at a relatively low temperature of about 200 to 300 °C, improving the crushability of wood. In this study, we performed the compositional sugar analysis of two kinds of hardwood pellets and cellulose torrefied at different temperatures, and tracked changes in the chemical composition. Most of the xylan was lost at 250 °C, and the cellulose content decreased with increasing temperature thereafter. Instead, chemical compounds which was not solubilized by a treatment with 72 %–4 % sulfuric acid (analytical acid-insoluble lignin) increased. It is considered that at 250 °C xylan was converted to acid-insoluble product and over 250 °C, cellulose was gradually carbonized to contribute to the increase of acid-insoluble lignin. These carbonized products contribute to the improvement of the heating value of torrefied wood.

**Key Words:** Wood pellet, Torrefaction, Compositional sugar analysis, Acid insoluble lignin, Thermogravimetric analysis

## 1. 緒言

地球温暖化が懸念されている昨今、石炭火力発電における二酸化炭素排出量を削減すべく、木質バイオマスとの混焼発電が提案されている。しかし、国内の大型石炭火力発電所では、微粉炭焚ボ

イラが採用されており、微粉炭機における石炭とバイオマスの粉碎性の違いより、熱量比3%程度までしか混焼できないとされてきた<sup>1)</sup>。この課題を解決すべく、木質バイオマスを半炭化（トレファクション, Torrefaction）し、石炭の性状に近づけることにより、既存の微粉炭機をそのまま

2022年10月4日受理

<sup>1,2</sup> 〒514-8507 津市栗真町屋町1577

<sup>3</sup> 〒651-2271 神戸市西区高塚台1丁目5-5

\* For correspondence (e-mail: nonaka@bio.mie-u.ac.jp)

利用しながら混焼率の向上を目指す取り組みが増えつつある<sup>1)</sup>。

半炭化とは不活性雰囲気下、かつ、200~300℃程度の比較的低温下で木材を加熱する熱変換反応である。この温度域では、主としてヘミセルロース<sup>2)</sup>やリグニンの脂肪族部分が分解される<sup>3)</sup>とされ、温度上昇とともに炭素に対する酸素の割合(O/C)が減少し、単位重量あたりの発熱量が向上することが報告されている<sup>3,4)</sup>。しかしながら、その多くは石炭同様、元素組成によって評価されており、含有化学成分に関する情報は少ない。

そこで本研究では、様々な温度で半炭化した二種の広葉樹ペレット(ゴムノキ、アカシア)について、汎用的なリグノセルロース組成分析法<sup>5)</sup>を適用し、化学成分組成に関するデータを得ることにより、温度上昇に伴う組成変化の解析を行うことを目的とした。ゴムノキは主に東南アジアなどの熱帯に生育し、天然ゴム(ラテックス)の原料となる樹液を生産する樹木の総称で、樹液を取りきった古木を木質バイオマス資源として有効利用することが求められている。アカシアは早生樹であり、パルプ産業の原料のみならず、燃料としても用いられる。半炭化における木材構成成分の反応の理解は、反応条件を精密制御するための基盤的情報として役立つことが期待される。

## 2. 実験

### 2.1. 木質ペレットの半炭化

試料には、ベトナム産のゴムノキおよびアカシアの木質ペレットを用いた。小型乾留炉(高周波誘電加熱装置 IMC-ASH-103 型, アイメックス株式会社)を使用し、窒素雰囲気下、木質ペレットを5℃/minで各目的温度(250, 260, 270, 280℃)まで昇温させ、その後60分間温度保持して半炭化を行った。得られた半炭化ペレット、および、未処理の木質チップを粉碎し、組成分析用の木粉を調製した。木材の主成分であるセルロースについても知見を得るため、同様にセルロースパウダー(40~100 mesh, ADVANTEC)を半炭化し、そのまま組成分析用試料として用いた。

### 2.2. 半炭化木質ペレットの元素分析・工業分析

水分・灰分・揮発分は重量法、C・H・Nは燃

焼熱伝導法、V-S(燃焼性硫黄)は計算(全硫黄=燃焼性硫黄+不燃性硫黄)、T-S(全硫黄)・T-Cl(全塩素)は、燃焼-イオンクロマトグラフ法、Na・Kは原子吸光法、総発熱量(熱量)はボンブ法により測定した。半炭化プロセスの熱量収率は、(1)式により算出した。

半炭化物熱量収率(cal%) =

$$\text{半炭化物収率(wt\%)} * \frac{\text{半炭化物熱量(kcal/kg)}}{\text{半炭化前熱量(kcal/kg)}} \quad (1)$$

### 2.3. 化学成分組成分析

アメリカ・国立再生可能エネルギー研究所(National Renewable Energy Laboratory, NREL)がプロトコルを公開しているリグノセルロース系バイオマスの構成糖分析・リグニン定量法<sup>5)</sup>を改変して組成分析を行った。2.1で調製した木粉0.3gをビーカーにとり、30℃の水浴中で72%硫酸を3mL加え、1時間濃酸加水分解を行った。なお試料のアルコール・ベンゼン脱脂処理は行わなかった。脱イオン水を加えて4%硫酸へと希釈し、ガラス製耐圧ボトルを用いて、オイルバスにて121℃、1時間希酸加水分解を行った。反応終了後、ボトルを水冷し、内標準物質としてリボースを加えたのち、内容物をガラスフィルター(1G4)を用いてろ過した。ろ液を取得後、ろ物が中性になるまで脱イオン水、熱脱イオン水で洗浄を繰り返す。105℃で乾燥後の秤量値を酸不溶性リグニン量とした。酸可溶性リグニンは、ろ液の205nmにおける吸光度を測定し、吸光係数を110(L/g・cm)として算出した。また、ろ液の一部を中和し、生じる沈殿を分離したのち、HPLC分析(カラム: Shodex SP0810(昭和電工株式会社), 移動相: 蒸留水, 流量: 0.6 mL/min, カラム温度: 80℃, 検出器: RID)により、グルコース、キシロースを定量した。これらを162/180倍、132/150倍して、それぞれグルカン、キシラン量に換算した。なお広葉樹ヘミセルロースの構成糖としてグルコースはマイナーであり、生成グルコースの大半はセルロース由来とみなせる。グルコースやキシロースの過分解補正は行わないこととした。100%から、酸不溶性リグニン、酸可溶性リグニン、グルカン、キシランの含有率を差し引いたものを「その他」(Others)と表示した。

## 2.4. 熱重量分析

示差熱重量同時測定装置 (TG/DTA6200, Seiko Instruments) を用いて、流速 300 mL/min の窒素雰囲気下で分析を行った。ゴムノキ木粉、市販の広葉樹キシラン (Xylan from beech wood, SERVA)、セルロース (セルロースパウダー 200-300 mesh, 東洋ろ紙) については、10 °C /min で設定温度 250, 260, 270, 280 °C まで昇温させ、その後 180 分間保持する半炭化を模した分析を行った。アカシア、ゴムノキの木質チップ、半炭化ペレットから調製した木粉については、105 °C に保持し、水分蒸発による重量減少がなくなったのち、昇温速度 10 °C /min で昇温し、その際の熱重量減少を記録した。

## 2.5. フーリエ変換赤外光分析

微量の組成分析用木粉を IR 吸収測定用の臭化カリウムとともに、ミニハンドプレス (MHP-1, Shimadzu) を用いて  $\phi$  4 mm の錠剤を成型し、測定用ホルダに入れ、フーリエ変換赤外分光光度計 (FT-IR8400S, Shimadzu) を用いて、FT-IR スペクトルを得た。

## 3. 結果と考察

### 3.1. 半炭化による収率や元素組成の変化

表 1 に、各温度で半炭化したアカシアペレット、ゴムノキペレットと原料木材の半炭化物の重量収率、熱量、半炭化による熱量収率、元素分析値を示す。半炭化温度が高くなるほど脱酸素、脱水素が進行し、炭素の割合が増加した。この傾向は他の樹種で行われた既往の研究においても同様である<sup>4) 6) 7)</sup>。結果として発熱量も増大していく。260 °C までの半炭化では 70 % 以上の重量収率を維持し、260 °C における原料木材あたり熱量収率は、アカシアで 86.8 %、ゴムノキで 83.9 % であった。揮発分の減少、灰分の増加もあわせて確認された。

### 3.2. 熱重量分析とモデル化合物を用いた半炭化収率についての考察

図 1 (a) に、示差熱重量同時測定装置を用いて、ゴムノキ木粉を 10 °C /min で昇温し、設定 250, 260, 270, 280 °C で半炭化 (実温度は、248, 257, 266, 274 °C) させたときの重量減少を示す。小型乾留炉での収率 76.2 %, 52.8 % (表 1) に対応するのは、設定 250, 280 °C の分析でそれぞれ 125.3 分、135.8 分であった。

表 1 250-280 °C で半炭化した広葉樹木質ペレットの収率、熱量、元素組成

試料名	半炭化温度 °C	半炭化物収率 wt% -db	半炭化物熱量 kcal/kg-db	半炭化物熱量収率 cal%	水分 %	灰分 % -db	揮発分 % -db	C % -db	H % -db	N % -db	V-S % -db	T-S % -db	Cl % -db	Na % -db	K % -db
Acacia pellet	-	100	4606	100	3.91	0.72	83.81	49.37	6.24	0.27	0.02	0.02	0.07	0.04	0.13
	250	79.8	5294	91.7	1.13	1.02	73.19	55.33	5.91	0.28	0.02	0.03	0.019	0.048	0.14
	260	72.6	5502	86.8	1.08	1.17	69.08	54.47*	5.79	0.31	0.01	0.03	0.007	0.054	0.16
	270	64.9	5739	80.9	0.96	1.25	64.05	59.97	5.71	0.31	<0.01	0.03	<0.005	0.059	0.18
	280	55.6	6236	75.2	1.11	1.50	55.41	64.80	5.24	0.36	<0.01	0.03	<0.005	0.070	0.21
Rubber tree pellet	-	100	4512	100	3.59	1.65	82.50	48.62	6.10	0.29	0.02	0.02	<0.01	<0.01	0.23
	250	76.2	5234	88.4	1.34	2.54	70.76	55.44	5.69	0.32	0.02	0.04	-	-	0.27
	260	70.3	5380	83.9	1.55	3.13	66.55	56.83	5.56	0.37	0.02	0.05	-	-	0.32
	270	62.0	5636	77.5	1.26	3.07	61.59	59.68	5.45	0.40	0.02	0.05	-	-	0.34
	280	52.8	6042	70.8	1.65	3.72	52.28	63.96	5.13	0.45	0.02	0.05	-	-	0.43

%-db は、%-dry base (乾燥重量基準の %)

\* 抽出誤差等による異常値と考えられる

広葉樹の化学組成は、一般的にセルロース 45 %、ヘミセルロース約 25~30 %、リグニン約 25~20 % である。広葉樹ヘミセルロースの主要な多糖はキシランである。そこでモデル化合物として、市販の広葉樹キシラン、セルロースを同様の分析に供した。図 1 (b) (c) に、キシラン（実温度は、245, 264, 266, 274 °C）、セルロース（実温度は、247, 256, 264, 274 °C）での重量減少を示す。キシランとセルロースの重量減少挙動は対照的であった。キシランの分解は速く、重量減少は反応時間 20 分前後で大きく、40 分を超えるとほぼ収率に変化がなかった。また 264 °C 以上の

温度ではほぼ同一線に重なることが確認された。一方、セルロースはヘミセルロースより重量減少が小さく、264 °C でも収率の減少は 10 % 程度で留まった。セルロースに含まれていた不純物や非結晶領域が熱分解するものと考えられた。274 °C では明らかに重量減少が大きくなり、この温度領域で熱分解の主反応が促進されることが示唆された。

ゴムノキの半炭化収率 76.2 % に対応する「設定 250 °C, 125.3 分」の分析では、キシラン収率 58.4 % (図 1 (b)), セルロース収率は 97.9 % (図 1 (c)) であった。セルロースの分解はごくわずかである

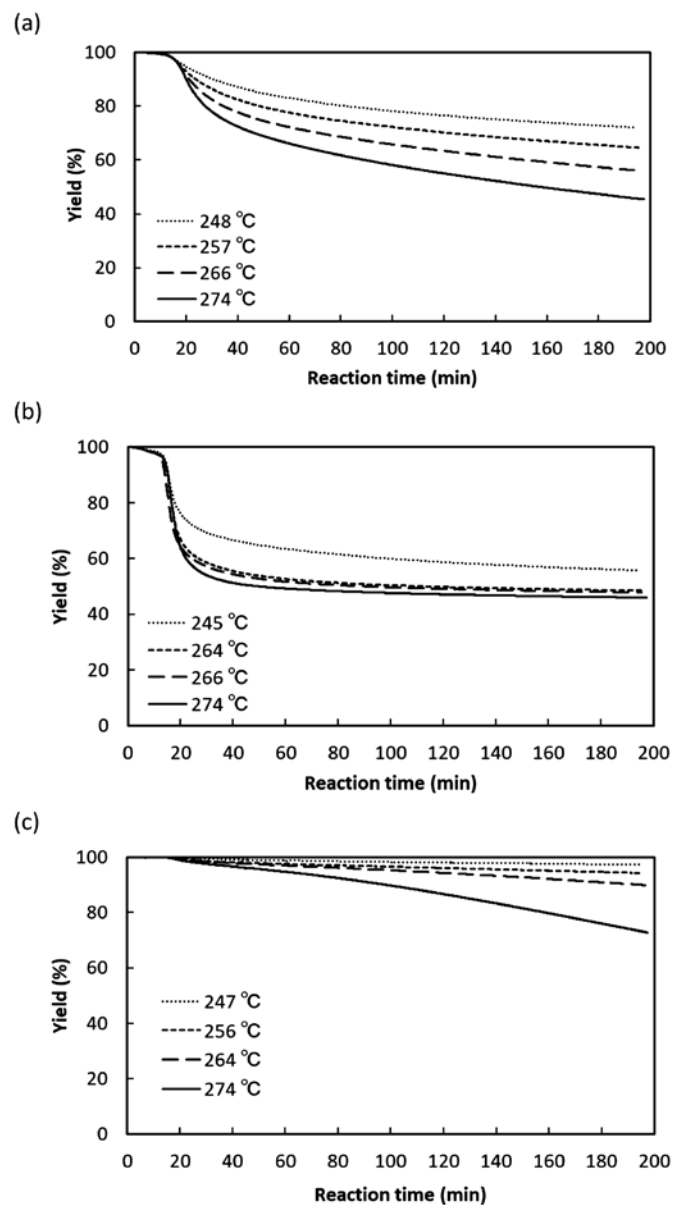


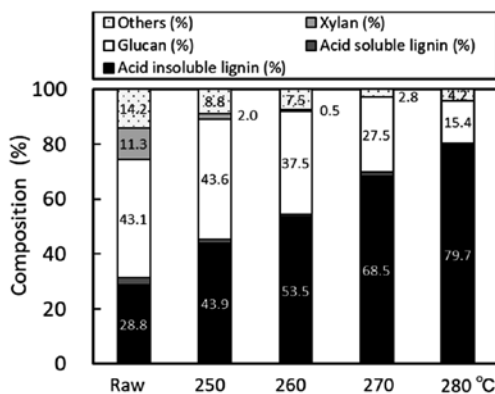
図 1 TG/DTA 装置を用いて異なる温度で半炭化したときの熱重量減少：  
(a) ゴムノキ, (b) キシラン, (c) セルロース

うえ、キシラン含量を30%と仮定しても30% × (100-58.4)% = 12.5%の減少にすぎず、23.8% (= 100-76.2)もの熱分解による揮発を説明しえない。同様に、半炭化収率52.8%に対応する「設定280℃, 135.8分」の分析では、キシラン収率は46.8%、セルロース収率は84.0%であり、やはりキシラン、セルロースの分解だけでは、47.2% (= 100-52.8)もの揮発の説明は難しい。この温度帯ではリグニンの熱分解による揮発も大きくない。木材中のヘミセルロースと市販のキシランでは熱分解特性が異なり、前者の方が周辺にセルロースやリグニンが存在し、ヘミセルロース熱分解フラグメント同士の再重合(チャー化)が抑制され、揮発しやすいものと推測された。そこで次項では、半炭化したアカシアペレット、ゴムノキペレットについて組成分析を行った結果を示す。

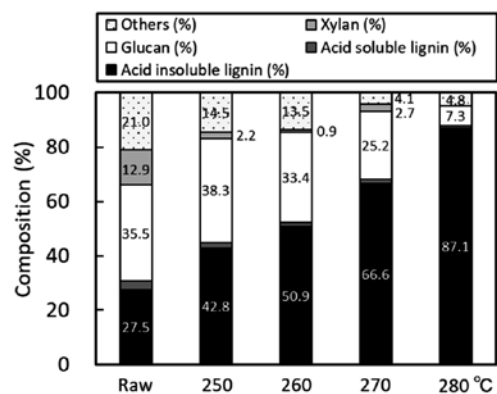
### 3.3. 半炭化による化学成分組成の変化

本報で採用した組成分析法は、濃硫酸、希硫酸による二段階の加水分解により、ヘミセルロースを加水分解、セルロースを膨潤・加水分解し、構成単糖へと変換し、この条件下水溶化しない成分を「酸不溶性リグニン」、可溶化する芳香族化合物を「酸可溶性リグニン」と定義して、定量する手法である。図2(a)(b)に、各温度で半炭化したアカシア、ゴムノキの組成分析の結果を、図2(c)(d)に、半炭化物の重量収率をふまえて計算した原料木材あたりの各成分の収率を示す。原料木材の組成は、酸不溶性・可溶性リグニン、グルカン、キシランを積算して80%程度となった。その他(Others)には、グルコース、キシロース以外のヘミセルロース構成糖(ウロン酸含む)、構成糖の過分解により生じるフルフラール類や有機酸、ヘミセルロースのアセチル基の加水分解で生成す

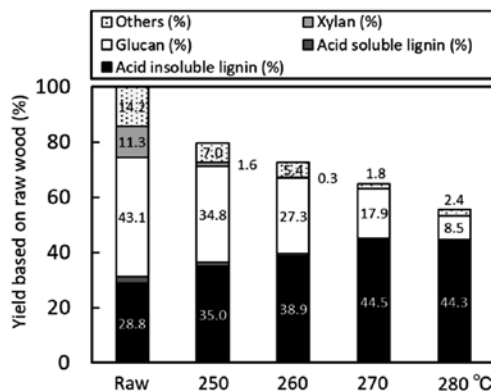
(a) Acacia



(b) Rubber tree



(c) Acacia



(d) Rubber tree

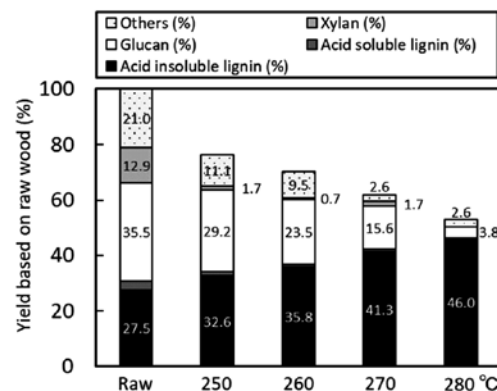


図2 250-280℃で半炭化した広葉樹木質ペレットの糖組成分析による化学組成：(a) アカシア、(b) ゴムノキ。半炭化前の原料木材を基準としたときの各成分の収率：(c) アカシア、(d) ゴムノキ

る酢酸, セルロースの加水分解不十分により生じるセロオリゴ糖, その他不明成分が含まれる。

250 °C の半炭化物では, アカシア, ゴムノキで収率は 79.8 %, 76.2 % (図 1) であるのに対して, キシランは 2.0 %, 2.2 % しか含まれておらず, ヘミセルロースの熱分解・消失が主要な反応と確認された。セルロースも分解したように見える (43.1 % → 34.8 %: 図 2 (c), 35.5 % → 29.2 %: 図 2 (d)) が, これは 250 °C の熱処理によってセルロースの重合度が低下し, 組成分析のための 72 % 硫酸 - 4 % 硫酸の処理で過分解が進行したことによる見かけ上の減少であり, 実際には「その他」に含まれると推測された。250 °C の半炭化では, 原料木材ベースの酸不溶性リグニンの収率はアカシア 35.0 % (図 2 (c)), ゴムノキ 32.6 % (図 2 (d)) であり, 5~6 % 程度の増加が認められた。この温度域ではセルロース由来のリグニン様物質の生成はまだ少なく (後述図 3), ヘミセルロースの分解・再重合による一部チャー化に基づくものと考えられた。

半炭化温度が上昇するとともに, 半炭化物中の

セルロース含量が減り, 対して, 酸不溶性リグニンが大きく増加した (図 2 (a) (b))。この傾向はゴムノキだけでなく, 既往のほかの樹種で行った研究でも報告されている<sup>8)~10)</sup>。280 °C の半炭化物では 87.1 % に達し, 硫酸にて加水分解されないリグニン様物質が大半を占めた。半炭化物の酸不溶性リグニン量はあくまで分析上の値であり, 72 % 硫酸 - 4 % 硫酸の処理で水溶化しない化学成分全般を指すことに留意が必要である。270, 280 °C ではグルカンとその他が大きく減少しており, この周辺温度領域でセルロースの分解が激しくなることは, 熱重量分析の結果 (図 1 (c)) でも推定されている。280 °C の半炭化での原料木材ベースの酸不溶性リグニンの収率は, アカシア 44.3 % (図 2 (c)), ゴムノキ 46.0 % (図 2 (d)) であり, 250 °C 以降で, それぞれ 9.3 % (= 44.3-35.0), 13.4 % (= 46.0-32.6) の増加である。よって広葉樹に含まれるセルロースを約 45 % と仮定すれば, 20~30 % が半炭化反応により, リグニン様物質に変換されたことを意味する。

小型乾留炉を用いてセルロースパウダー (40-100

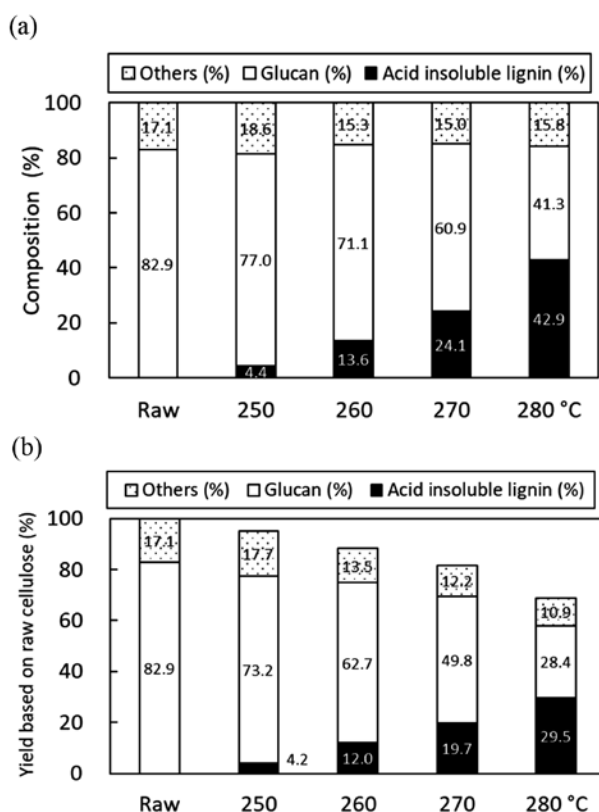


図 3 (a) 250-280 °C で半炭化したセルロースの糖組成分析による化学組成。  
(b) 半炭化前のセルロースを基準としたときの各成分の収率

mesh) を同様に半炭化したところ、250, 260, 270, 280 °Cでの反応後の収率は、95.0, 88.2, 81.6, 68.8 %であった。図3 (a) に、得られた半炭化セルロースパウダーの糖組成分析の結果を、図3 (b) に、半炭化収率を考慮した原料セルロース基準の収率を示す。半炭化温度上昇とともに加水分解により得られるグルコースは減少し、代わりに見かけの酸不溶性リグニンが増加することが確認された。270, 280 °Cでは、原料セルロース基準でそれぞれ19.7 %, 29.5 %のリグニン様物質が存在した。これは上述の推測とおよそ一致した。これらの結果より、250 °Cまでは主としてヘミセルロースが、以降の温度ではセルロースが、脱酸素を伴って熱分解し、揮発により失われるとともに、試料内にはリグニン様物質が増加し、半炭化木材の発熱量の向上にも寄与するものと推測された。

図4に半炭化物のFT-IR スペクトルを示す。多糖類（ヘミセルロース、セルロース）の分解は、具体的には、グリコシド結合の開裂、脱水反応、及びそれに続くケト・エノール互変異性化を経由した分解・気化反応である<sup>11)~13)</sup>。3400 cm<sup>-1</sup>付近の水酸基のピークが半炭化温度の上昇とともに減

少する傾向が見られ、半炭化によって脱水反応が進行していると考えられる。また、1060 cm<sup>-1</sup>付近のC-O結合のピークが減少し、1620 cm<sup>-1</sup>付近のアルケンのピークが増加していた。これは生じた脱水反応により不飽和結合が形成されたためと考えられる。

図5 (a) (b) に各温度で半炭化したアカシアペレット、ゴムノキペレットから調製した木粉の熱重量分析の結果を示す。半炭化温度が高くなるほど、熱重量減少は小さくなる。図5 (c) (d) に、半炭化重量収率を考慮した場合の原料木材あたりのアカシア、ゴムノキの熱重量減少を示す。ゴムノキの場合、105 °Cから375 °Cまで10 °C/minで昇温したとき、重量は72.1 %減少した。これに対して、原料木材を250, 260, 270, 280 °Cで半炭化したのち、105 °Cから375 °Cまで10 °C/minで昇温した場合、それぞれ重量減少は64.4 %, 64.3 %, 60.4 %, 55.5 %となった(図5 (d))。これは半炭化過程により熱分解や揮発をしにくい成分が増加したことを意味する。特に270, 280 °Cの半炭化では、リグニン様物質の重合が進行し、熱安定性が向上するものと考えられた。アカシアでもほぼ同様の傾向が確認された。

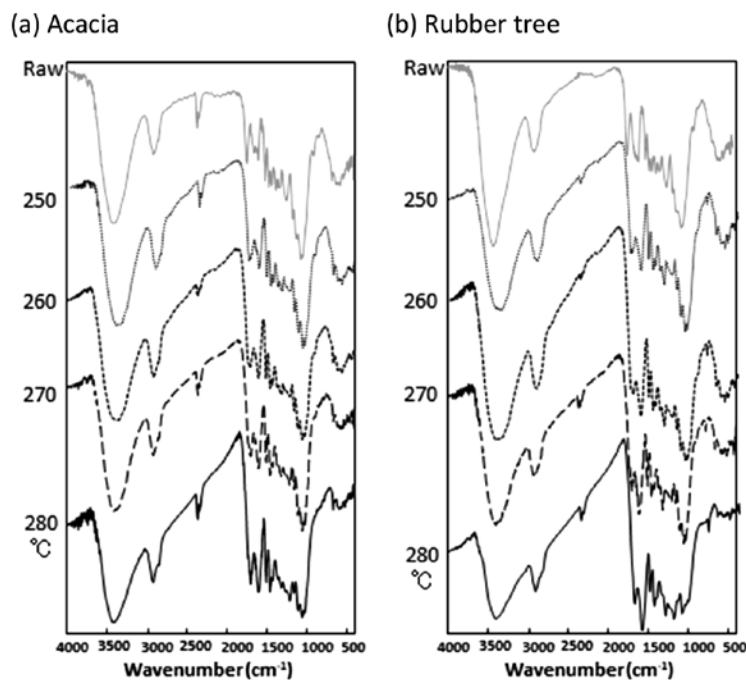


図4 半炭化広葉樹木質ペレットのFT-IR スペクトル：(a) アカシア、(b) ゴムノキ

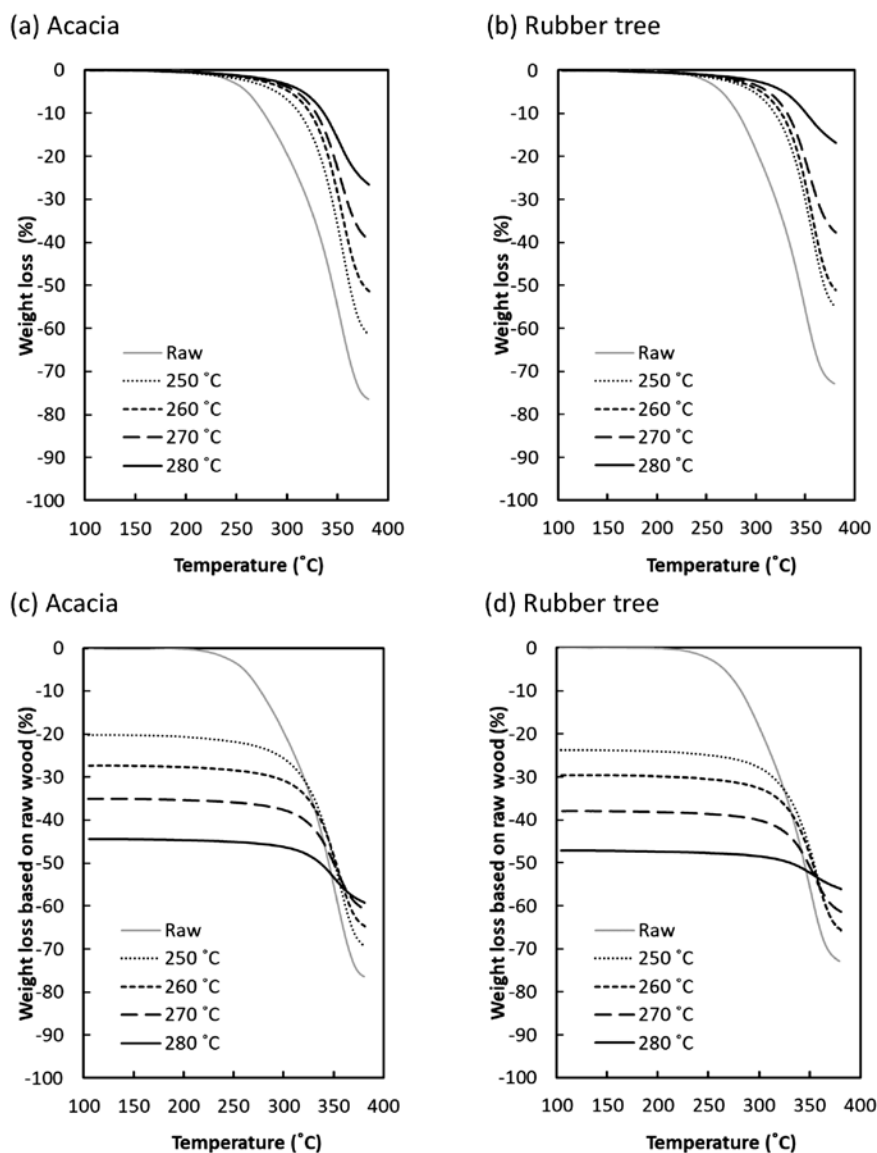


図5 250-280 °C で半炭化した広葉樹木質ペレットの熱重量曲線：(a) アカシア, (b) ゴムノキ。半炭化前の原料木材を基準としたときの熱重量減少：(c) アカシア, (d) ゴムノキ

#### 4. まとめ

広葉樹ペレット 2 樹種 (アカシア, ゴムノキ) を 250~280 °C, 60 分半炭化し, 得られた半炭化物に対して, リグノセルロース系バイオマスの組成分析法を適用し, 含有化学成分を調査した。250 °C における半炭化物中のキシランの大半は失われており, 以降温度上昇とともにセルロースの含有率が低下し, 代わりに 72 % 硫酸 - 4 % 硫酸の処理で水溶化しないリグニン様物質 (酸不溶性リグニンとして定量) が増加した。これらは元々

木質ペレットに含まれるリグニンに加え, 250 °C の半炭化まではヘミセルロース由来, それ以上の温度の半炭化ではセルロース由来の炭化物が増加するためと考えられ, 半炭化木材の発熱量の向上にも寄与するものと推測された。また半炭化物の熱重量分析より, 半炭化により熱安定性の向上が認められ, 特に 270 °C 以上で熱分解しやすい結合が減少することが示唆された。



## 要 約

石炭火力発電での二酸化炭素排出量を削減すべく、木材との混焼が提案されている。木材を混焼発電に適した燃料に変換するための技術として半炭化が注目されている。半炭化とは不活性ガス雰囲気下、かつ 200~300 °C 程度の比較的低温下で木材を加熱する熱変換反応であり、木質の粉碎性向上させる。本研究では、異なる温度で半炭化させた広葉樹ペレット（2 種）とセルロースの糖組成分析を行い、化学組成の変化を追跡した。250 °C において半炭化物中のキシランの大半は失われており、以降温度上昇とともにセルロースの含有率が低下した。代わりに 72 % 硫酸 - 4 % 硫酸の処理で水溶化しないリグニン様物質（酸不溶性リグニンとして定量）が増加した。250 °C までは主としてヘミセルロースが、以降の温度ではセルロースが徐々に炭化して、酸不溶性化合物へと変換されたためと考えられる。これら炭化生成物は、半炭化木材の発熱量の向上にも寄与する。

## 引用文献

- 1) 宇野博志, 菊池雄介: 国内で注目を集める石炭火力発電でのバイオマス混焼の今後の見通し, 三井物産戦略研究所レポート (2017年7月3日)
- 2) Pushkin, S.A., LV. Kozlova, A.A. Makarov, A.N. Grachev, T.A. Gorshkova: Cell wall components in torrefied softwood and hardwood samples. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **116**, 102-113 (2015)
- 3) 佐野 寛, 本庄孝子: バイオマス半炭化の原理と効用. *高温学会誌*, **37**, 43-49 (2011)
- 4) Wen, J.L., S.L. Sun, T.Q. Yuan, F. Xu, R.C. Sun: Understanding the chemical and structural transformations of lignin macromolecule during torrefaction. *Appl. Energy*, **121**, 1-9 (2014)
- 5) National Renewable Energy Laboratory, USA: Determination of Structural Carbohydrates and Lignin, NREL/TP-510-42618, <http://www.nrel.gov/docs/gen/fy13/42618.pdf> 2022年5月15日参照
- 6) Chen, Y.C., W.H. Chen, B.J. Lin, J.S. Chang, H.C. Ong: Impact of torrefaction on the composition, structure and reactivity of a microalga residue. *Appl. Energy*, **181**, 110-119 (2016)
- 7) Bach, Q.V., W.H. Chen, Y.S. Chu, Ø. Skreiberg: Predictions of biochar yield and elemental composition during torrefaction of forest residues. *Bioresour. Technol.*, **215**, 239-246 (2016)
- 8) Silva, C.M.C., B.R. Vital, A.C.O. Carneiro, E.V.S. Costa, M.A. Magalhães, P.F. Trugilho: Structural and compositional changes in eucalyptus wood chips subjected to dry torrefaction. *Ind. Crops Prod.*, **109**, 598-602 (2017)
- 9) Wang, L., E. Barta-Rajnai, Ø. Skreiberg, R. Khalil, Z. Czégény, E. Jakab, Z. Barta, M. Grønli: Impact of Torrefaction on Woody Biomass Properties. *Energy Procedia*, **105**, 1149-1154 (2017)
- 10) Werner, K., L. Pommer, M. Broström: Thermal decomposition of hemicelluloses. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **110**, 130-137 (2014)
- 11) Shen, D.K., S. Gu, A.V. Bringwater: Study on the pyrolytic behaviour of xylan-based hemicellulose using TG-FTIR and Py-GC-FTIR. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **87**, 199-206 (2010)
- 12) Huang, J., C. He, L. Wu, H. Tong: Thermal degradation reaction mechanism of xylose: A DFT study. *Chem. Phys. Lett.*, **658**, 114-124 (2016)
- 13) Shen, D.K., S. Gu: The mechanism for thermal decomposition of cellulose and its main product. *Bioresour Technol*, **100**, 6496-6504 (2009)