

身近にある植物（木質系バイオマス）が持つ熱エネルギー

～燃料としての可能性追求～

宇部工業高等専門学校 機械工学科 5年

金本知也, 中村祐太, 吉岡秀樹

1 はじめに

人類は古くから植物から得られるエネルギーを生活の中で有効に活用してきた。しかしながら、産業革命以降、石炭・石油の使用量が増大するに伴い、エネルギー源としての植物の価値は低下の一途をたどる。その理由は、単位体積当りのエネルギー密度が石油・石炭と比べて低く、エネルギーの輸送性や貯蔵性が劣るためである。しかしながら、化石燃料の枯渇や地球温暖化など、我々は早急に対策をとらねばならない環境・エネルギー問題に直面している。また先般の東日本大震災以降、現在の大量生産・大量消費型生活様式を見直そうとする動きも見られる。すなわち、エネルギーの自給自足、再生可能エネルギーの利用、便利すぎる生活からの脱却などを推進する機運が高まっている。

我々の身近に豊富に存在しながらも熱エネルギー源としてほとんど利用されていない植物（**木質系バイオマス**）を人々の生活に役立てることは、化石燃料の使用量を減らす以外にもいくつもの波及効果が期待できる。たとえば、(1) 放置されている里山、山林、都市近郊の林部を管理することで、豊かな環境・植生・自然が再生される、(2) 植物の光合成促進や炭素中立によって CO₂ が削減される、(3) 熱エネルギーの自給率を高めることで、災害に強い街づくりができる、(4) 山林を管理することで保水力を高め、地すべりなどに対する防災力を高める、(5) 新たな雇用（山林を管理する仕事、熱エネルギー源として付加価値を高める仕事など）を生み出し、地域が活性化する、などが考えられる。

本実験では、木質系バイオマスが持っている**熱エネルギー源**としての可能性を調べる。まず第2章においてこれまでに報告されている木質系バイオマスに関する基礎的知見について学習・調査を行いその結果をまとめる。次にこの調査結果を踏まえて第3章で実験の目的・目標を述べる。第4章では、実験方法とその結果を述べる。最終的に第5章において、本実験のまとめを述べる。

2 事前学習・調査のまとめ^{(1), (2)}

2-1 バイオマス, 木質バイオマスの定義

バイオマス (biomass= bio + mass) に関する明確な定義は存在しないが、一般的にはある一定量集積した動植物を起源とする有機性資源を指す(ただし化石燃料は除く)。バイオマスの種類は多岐にわたるが、恒常的に一定量供給できるエネルギー資源として候補にあがるものとして**エネルギー作物**がある。

※**エネルギー作物**: エネルギー製造を主目的に栽培される植物で、樹木などの木質系バイオマスやサトウキビ、トウモロコシ、アブラナなどの草本系バイオマスを指す。

2-2 バイオエネルギー

バイオマスから得られたエネルギーを表す用語である。バイオマスエネルギーと表現することもあるが、世界的な潮流としてバイオエネルギーが使用される傾向にある。

バイオエネルギーと人類の関係は古く、19世紀までは薪炭がエネルギーの主流であった。20世紀以降化石燃料がエネルギーの主役となっているが、近年ではエネルギー・環境問題軽減に貢献できるエネルギー資源としてバイオマスが改めて注目されている。その理由を以下にまとめる。

① **再生可能**である。

- ② **貯蔵性・代替性**（石油石炭を動力源とする既存システムへの適用が可能）である。
- ③ **カーボンニュートラル**である。
- ④ **エネルギーの自給率向上**を推進できる。
- ⑤ **土壌や地下水の保全**に貢献できる。

2-3 木質バイオマスの燃料特性を表す指標

木質系バイオマスの燃料特性を特徴付ける因子として、①**元素組成と成分（構造）**、②**発熱量とエネルギー密度**が挙げられる。

まず、①元素組成と成分（構造）について述べる。木質系バイオマスは主として**炭素（C）**と**水素（H）**と**酸素（O）**からなる。また、これらの元素が結合し多種多様な成分を形成するが、主なものとして**セルロース**、**ヘミセルロース**、**リグニン**がある。セルロースは平均分子式 $(C_6H_{10}O_5)_n$ で示され、木質系バイオマスの 40~50% を占める。ヘミセルロースの平均分子式は $(C_5H_8O_4)_n$ であり木質系バイオマスの 10~30% 程度を占める。リグニンは極めて複雑な構造をしており、その構造は未だ解明されておらず、木質系バイオマスの 20~30% 程度を占める。

次に②発熱量とエネルギー密度に関して、バイオマスの（高位）発熱量 Q は次式で推算できる。

$$Q[MJ/kg] = 45.71 \times C [\%] - 2.70 \quad (1)$$

また、**エネルギー密度とは単位体積当り、あるいは単位質量当たりの発熱量**で定義され、エネルギー資源としては単位体積当たりのエネルギー密度が重要である。

2-4 燃料として利用される木質系バイオマス（薪炭と木炭、ペレット）の特徴

木質系バイオマス由来の燃料として、薪、木炭、ペレットなどがある。これらの特徴を表 1 にまとめる。

[薪について]

伐採したばかりの樹木では、その質量の半分あるいはそれ以上が水分で、湿量基準含水率 $M=60\%$ 程度である（ M の算出法は後述）。薪を燃やした際に出る煙やススは、薪からの水分蒸発や可燃性ガスの不完全燃焼の結果生成される。また、薪の燃焼熱の一部は水分の蒸発に使用されるため、含水率の高い薪ほど正味の発熱量は低くなる。

※湿量基準含水率 M の計算式

$$M = \frac{W_w}{W_w + W_0} \times 100 (\%) \quad (2)$$

ここで、 W_w は水分質量、 W_0 は対象樹木の全乾質量である。

[木炭について]

①炭化とは

木質系バイオマスを空気（酸素）の供給を制限して 400 から 600°C 程度に加熱し、固体生成物（炭）を得る技術が炭化である。2-3 で述べた木質系バイオマスの主要構成成分であるセルロース、ヘミセルロース、リグニンの熱分解が生じ、分解成分が蒸発することで固体内部の炭素含有量が高まる。

②炭化・木炭の課題

エネルギー密度が低く、特に実用的に最も重要な単位体積当たりのエネルギー密度が低い。この原因の 1 つは空隙を多く含むという木炭独特の構造に由来するものである。もう 1 つの理由として、加熱の過程で水分だけでなくガスやタールなどの有機成分も揮発脱出してしまふことがある。一般的な木炭は重量収率で 1/4 程度、エネルギー収率で 1/2 程度であるとされる。

表1 木質系バイオマス由来燃料の特徴

	長所	短所	発熱量 Q と含水率 M の関係
薪	製造が容易（個人でも製造可能）	火力の調節が難しく、煙が多い。 高い出力が得られない。	Q = 10 GJ/ton （生材, M=60%） Q = 18 GJ/ton （薪, M=15~20%）
木炭	製造技術が確立されている。 発熱量が高く、燃焼時間が長い。 煙が出ない。	歩留まりが低い。 発熱量当たりの生産コストが高い。 用途が限定される（煮炊き、火鉢など）。	
ペレット	品質が安定しており、取り扱いが容易。 火力の調整・管理が可能。 発熱量、エネルギー密度が比較的高い。 ストーブから発電混焼用燃料まで幅広く使用できる。	製造工程が複雑である。 製造コストが高い。 水湿に弱い。 流通ルートが未成熟である。	Q = 19 GJ/ton （薪, M=6~10%）

5 木質系バイオマスの燃料特性

表2に木質系バイオマスおよび化石燃料の燃料特性をまとめる。この表に示すように、木質系バイオマスのエネルギー密度は化石燃料の1/7から1/2程度とされている。

表2 木質系バイオマス由来燃料と化石燃料の燃料特性

燃料	高位発熱量 (GJ/ton)	かさ密度 (ton/m ³)	エネルギー密度 (GJ/m ³)	石油 1 (m ³) と等価 な熱量を貯蔵でき る容積 (m ³)
薪	18	0.35	6.3	5.9
ペレット	19	0.65	12.4	3.0
石炭	27	1.00	27.0	1.4
石油	47	0.79	37.1	1.0

3 実験の目的・目標

本実験の目的は、**木質系バイオマスを用いて新しい燃料を創成すること**、また、**CO₂削減や環境問題の解決に資する新燃料を創成すること**である。特に、木質系バイオマス由来燃料の最大の弱点である、**単位体積当たりの発熱量（エネルギー密度）が低い**、という点の改善に取り組む。これを達成するために本実験では2つの目標を定める。1つ目は、木質系バイオマスが持つエネルギー密度とは、そもそもどの程度のものか、どのようにして評価するのか、を明らかにすることとである。2つ目の目標は、木質系バイオマス由来燃料のエネルギー密度を高めるためには、どのような手法が有効であるかを明らかにすることである。

具体的には木質系バイオマスとして、タケ（マダケ）とナラを使用し、エネルギー密度を高める手法として**加熱処理**および**加熱・加圧（ホットプレス）処理**を採用する。次章以降に実験の詳細を述べる。

4 実験方法と結果

実験1 加熱処理による木質系バイオマスの炭化実験

本実験で使用する材料はマダケ（熊本県菊池市の竹林から H26 年 3 月に採取）とナラ（市販の薪）であり、それぞれタケ、ナラと称する。

実験 1-1 木質系バイオマスを炭化させるために必要な加熱条件を調べる

【焦点】

- ① 木質系バイオマスは、どのような熱処理（温度&時間）によって炭化するのか.
- ② 体積，重量，密度は，熱処理によってどの程度減少するのか.
- ③ バイオマスの種類によって必要な熱処理条件は異なるのか.

【実験手順】

- ① 試料を 10×10×10mm に加工し，質量と密度を測定する.
- ② 温度を一定に保持した電気炉に 10×10×10mm の試料を入れる．この際，試料の酸化を抑制するためにアルミ箔で覆う.
- ③ 一定時間加熱を施した後，試料を電気炉から取り出す.
- ④ 冷却（自然冷却）後，試料の表面の様子（色合い）を観察する．また，体積と質量を測定する.

【実験結果】

✓ 結果 1 試料表面の様子（色合い）の変化

図 1, 2 にタケ，ナラから作製した試料に加熱処理を施し，冷却後の試料の色合いを観察した結果を示す．得られた結果を以下にまとめる．

- ① 一定時間（5，15，30min）保持する加熱処理を行った場合，加熱温度が高いほど黒色化が進行する.
- ② 10×10×10mm の試料であれば，5min 程度の加熱で黒色化させることができる.
- ③ 5min の加熱を施した場合，タケでは 350℃，ナラでは 400℃の加熱で明確な色合いの変化が生じる.
- ④ 一定温度（300，350，400℃）で保持時間を変えた場合，保持時間が長くなるほど黒色化が進行する.

✓ 結果 2 試料の質量・体積・密度の変化

図 3, 4 に加熱処理（保持時間 5min）によるタケ材とナラ材の質量・体積・密度の変化を示す．また，得られた結果を以下にまとめる．

- ① どちらの材料においても質量，体積，密度いずれの値も温度の上昇によって減少する.
- ② 各値の減少が始まる温度はナラのほうがタケよりも高い．試料の質量と密度が減少を始める温度は，タケでは 300℃，ナラでは 400℃である.
- ③ どちらの材料においても，500℃での加熱処理を行うと，質量は 30%程度，体積は 60%程度，密度は 20%程度まで減少する.

【実験の小まとめ】

黒色化の程度や質量・体積・密度の変化から木質系バイオマスの炭化は加熱温度や保持時間によって変化することが分かった．また，試料黒色化の程度と質量・密度の減少度には相関がある．この質量減少は水分の蒸発と木材成分の熱分解によって生成されたガスやタールの離脱による．木質系バイオマス由来燃料の高エネルギー密度化を図る上で，ガスやタールなどの可燃成分は試料中に残留させることが望ましい．したがって，タケでは 300℃から 400℃の加熱，ナラでは 350℃から 450℃の加熱を施すことで単位体積当たりのエネルギー密度を高めることが期待できる．

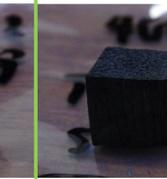
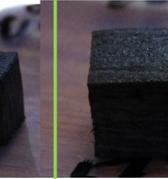
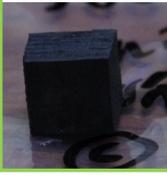
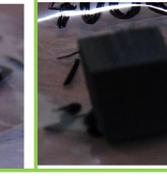
保持時間 (min)	加熱温度 (°C)						
	200	250	300	350	400	450	500
5							
15							
30							

図1 タケに加熱処理を施した場合の表面様相（色合い）の変化. 加熱温度と保持時間を変えて実験を行った.

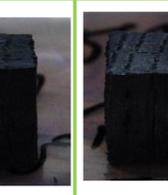
保持時間 (min)	加熱温度 (°C)						
	200	250	300	350	400	450	500
5							
15							
30							

図2 ナラに加熱処理を施した場合の表面様相（色合い）の変化. 加熱温度と保持時間を変えて実験を行った.

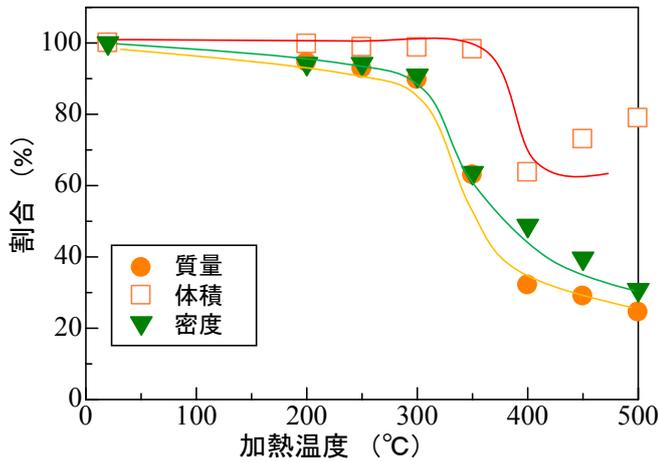


図3 タケの質量・体積・密度と加熱温度の関係 (加熱保持時間=5min)

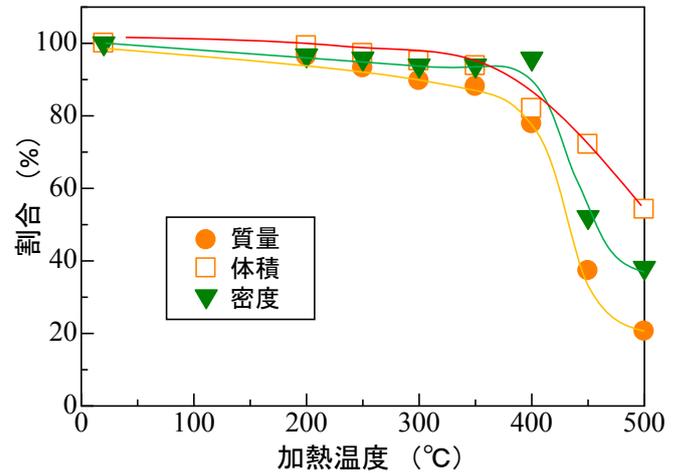


図4 ナラの質量・体積・密度と加熱温度の関係 (加熱保持時間=5min)

実験 1-2 熱処理が材料の構造に与える影響を調べる.

【焦点】

- ① X線回折 (XRD) で構造解析を行い、熱処理が試料の構造に与える影響を調べる.
- ② 木種、保持時間によって構造に変化が表れるのかを調べる.

【実験手順と実験装置・実験条件】

- ① 実験 1 で作製した試料 (保持時間 5min) に対して、X線回折 (XRD) を用いて構造 (材料を構成する分子の 3次元構造) を調べる.
- ② X線回折装置は Rigaku, UltimaIV (Cu K- α) である.
- ③ 実験条件は、管電圧 40kV、管電流 40mA、スキャン速度 4°/min、測定範囲 (回折角) $2\theta = 5 \sim 80^\circ$ とした.

【実験結果】

図 5, 6 は XRD で調べたタケ, ナラの構造と加熱温度の関係を示している. この実験より、温度によって試料の構造が変化していることが分かった. 得られた項目を以下にまとめる.

- ① 図 5 に示すように、300°Cで加熱したタケでは回折角 $2\theta = 20^\circ$ 前後の▼で示す位置にピークが表れており、これらのピークはセルロースの存在を示している.
- ② 木質系バイオマスの主成分であるヘミセルロースやリグニンをこの図から見出すことはできない. (この 2つは非晶質であるため XRD パターンにおいてはセルロースのようなピークは観察されないため.)
- ③ 400°Cで加熱したタケではセルロースのピークは消滅しており、セルロースが熱分解したことが分かる.
- ④ 500°Cで加熱したタケでは、 2θ が 20° , 40° を超えた矢印で示す位置に炭の存在を示すなだらかなピークが表れており、試料が炭化していることが確認された.
- ⑤ 図 6 に示すようにナラにおいては、加熱温度が 400°Cに達しても依然としてセルロースのピークが観察された. 500°Cの加熱を施したナラでは、セルロースは分解しているが、試料は十分に炭化していない.
- ⑥ ナラでは試料を構成する成分の熱分解や炭化にタケよりも高い温度が必要であることが分かった.

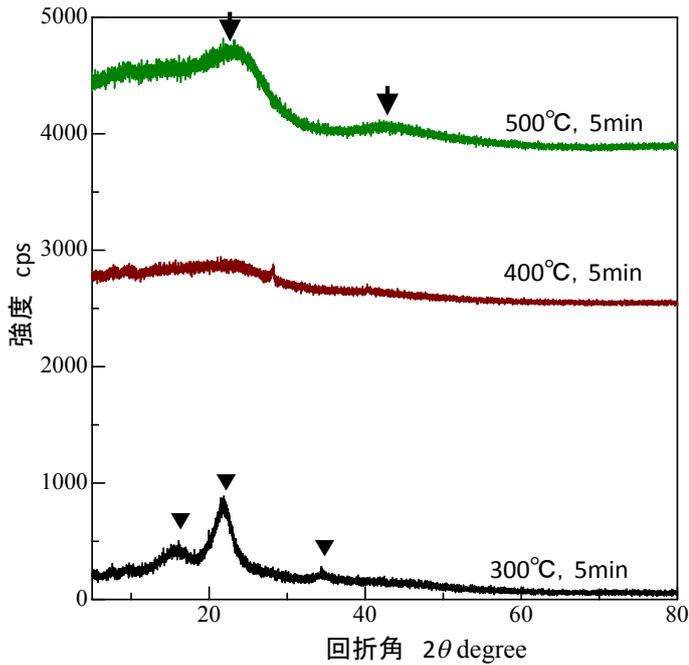


図5 タケの構造解析結果

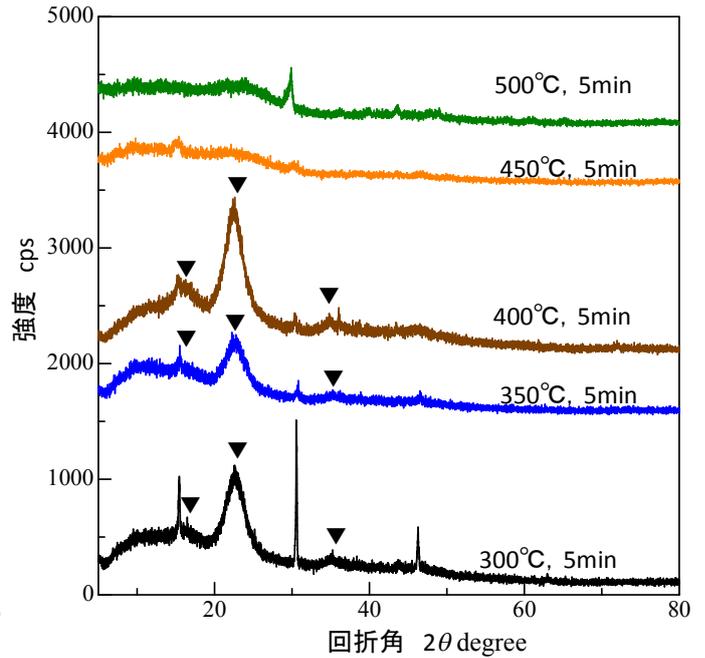


図6 ナラの構造解析結果

実験 1-3 熱処理が材料の構成元素に与える影響を調べる.

【焦点】

- ① 木質系バイオマスの燃料統制は材料の炭素含有量に依存することから、試料の元素分析 (CHN 分析) を行い、熱処理によって各値がどのように変化するのかを調べる.
- ② 木種によって、傾向の違いはあるのかを調べる.

【実験装置および実験条件】

CHN 分析には元素分析装置 (PERKIN ELMER Series II CHNS/O Analyzer 2400) を使用した. 実験 1 で作製した試料から 1.5mg 程度の試料を取り出し分析に用いた. 燃焼管の温度は 925°C, 還元管の温度は 640°C とした.

【実験結果】

✓ 結果 1 CHN 分析

図 7, 8 にタケおよびナラに含まれる C, N, N (wt.%) に及ぼす加熱温度の影響を調べた結果を示す. この実験から、いずれの材料においても C% は加熱温度の上昇とともに高くなることが分かった. 得られた結果を以下にまとめる.

- ① 図 7 に示すようにタケに 400°C, 5min の加熱を施すと、約 65% まで C% が高まる.
- ② 図 8 に示すようにナラに 400°C, 5min の加熱を施した場合は C% は 45% 程度であるが、500°C, 5min の加熱では 70% 付近まで C% が高まる.
- ③ 加熱温度が高くなるほど、H% は減少、N% は増加する傾向がある.

④

✓ 結果 2 エネルギー密度

得られた C% を (1) 式に代入し発熱量 (J) を求めた. 図 9 はタケおよびナラの単位体積当たりの発熱量 (エ

エネルギー密度) と加熱温度の関係を示している. 図に示すように, タケでは 300℃の加熱, ナラでは 400℃の加熱でエネルギー密度が最も高くなる. したがって, 乾燥させただけの試料や十分に炭化させた試料よりも炭化が不十分な試料のほうが, 単位体積当たりの発熱量は高いことが分かった. この結果は高エネルギー密度な木質系バイオマス由来燃料を創成する上で極めて重要な知見である.

次に, 図 10 は同じ試験結果を単位質量当たりの発熱量でまとめたものである. 発熱量は C%が高いほど高くなるので, 加熱温度が高く C%が高い試料ほどエネルギー密度は高くなる.

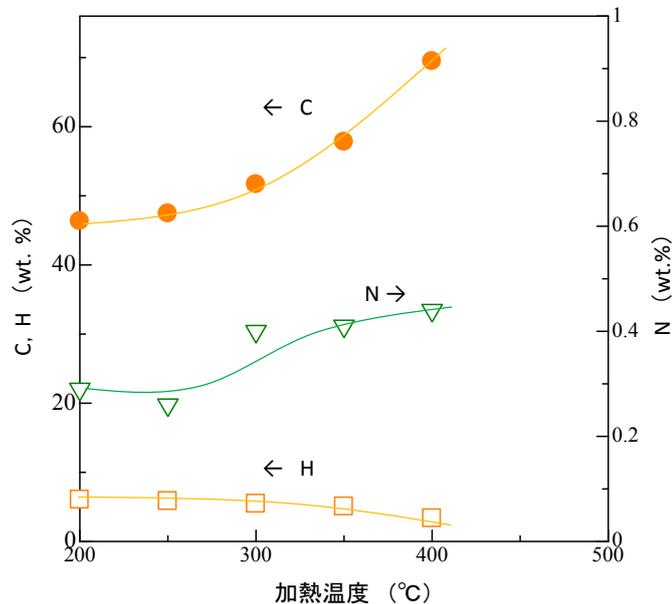


図 7 タケの CHN 含有量と加熱温度の関係

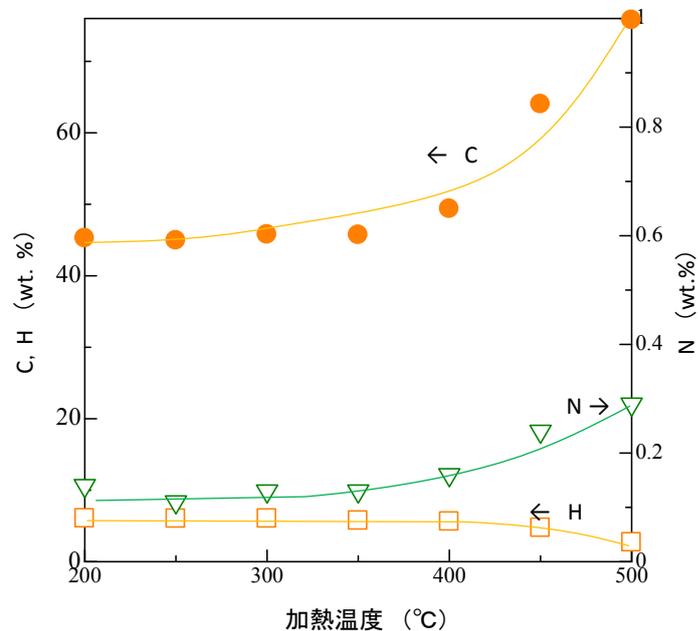


図 8 ナラの CHN 含有量と加熱温度の関係

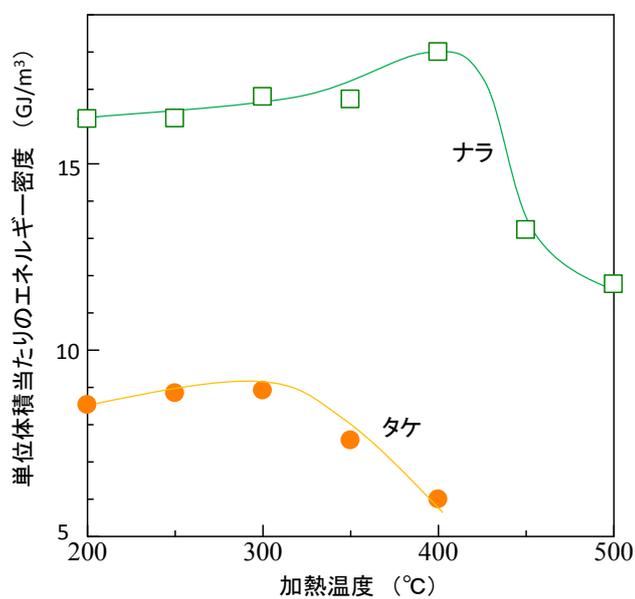


図 9 タケとナラの単位体積当たりの発熱量 (エネルギー密度) と加熱温度の関係

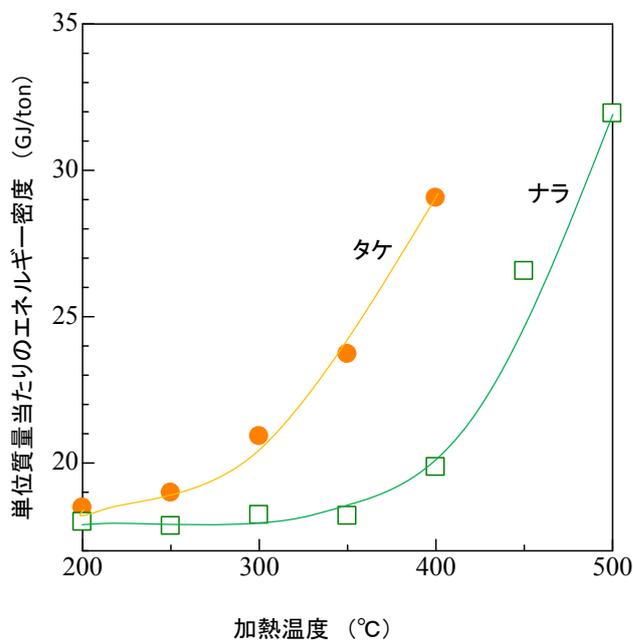


図 10 タケとナラの単位質量当たりの発熱量 (エネルギー密度) と加熱温度の関係

実験2 ホットプレスを用いた加圧・加熱処理によるバイオペレットの創製実験

実験2-1 ホットプレスによって木粉を炭化・成型できるのか

【焦点】

- ① 木質系バイオマスを加圧・加熱（ホットプレス）処理を施した場合、どのような変化が生じるのか。
- ② 体積、重量、密度は、ホットプレス処理によってどのように変化するのか。

【実験手順】

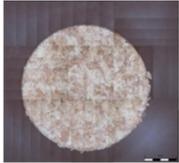
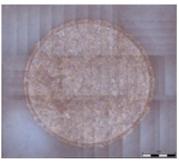
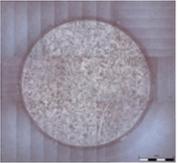
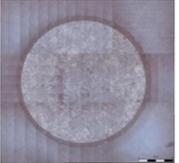
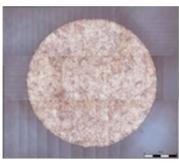
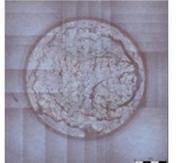
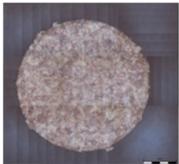
- ① ナラ材を裁断し木粉化した後、メッシュ 500 μm のふるいにかける。
- ② 適当な量をホットプレス型に挿入する。
- ③ 木粉を入れた型をホットプレス装置に設置する。
- ④ 加熱温度を設定し、加熱を行う。温度を安定させるために 30min 程度無負荷状態で保持する。
- ⑤ 加圧力を設定し、プレス実験を行う。
- ⑥ 所定の時間プレスを施した後、除荷し型を取り出す。
- ⑦ 型を冷却（自然冷却）後、試料を取り出す。

【実験結果】

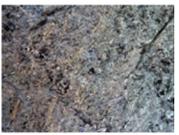
ナラを用いて作製した木粉に種々の加圧、加熱条件を加え、成型体の外観を観察した結果を図 11 に示す。また、同実験から得られた成型体の密度を測定した結果を図 12 に示す。以上より得られた結果を以下にまとめる。

- ① 加圧と加熱を同時に施すことで、木粉から緻密な成型体を得ることができる。
- ② 一定圧力下では、温度が高いほど成型体は黒色化する。また、一定温度下では圧力が高いほど成型体は黒色化する。
- ③ 加熱温度が 350 $^{\circ}\text{C}$ 、加圧力が 30MPa 以上の条件では、成型体が得られなかった。
- ④ 加熱温度が 300 $^{\circ}\text{C}$ までは、温度が高いほど成型体の密度は上昇する。一般的なナラの密度は 0.7g/cm³ 程度であることから、本実験で行ったホットプレス処理により密度は最大で 2 倍程度まで高くなっている。
- ⑤ 同一温度の加熱条件下では加圧力が高いほど密度が高くなる。

以上より、加圧と加熱を同時に加えるホットプレス処理によって、木粉から緻密で高密度な成型体を得られることが分かった。

圧力 MPa	加熱時間 °C				
	200	250	300	320	350
15					
30					
50					

(a) ホットプレス処理により作製した成型体の外観

圧力 MPa	加熱時間 °C				
	200	250	300	320	350
15					
30					
50					

(b) 成型体の表面

図 11 ナラの木粉にホットプレス処理を施し得られた成型体の様相. (加圧力, 加熱温度の影響)

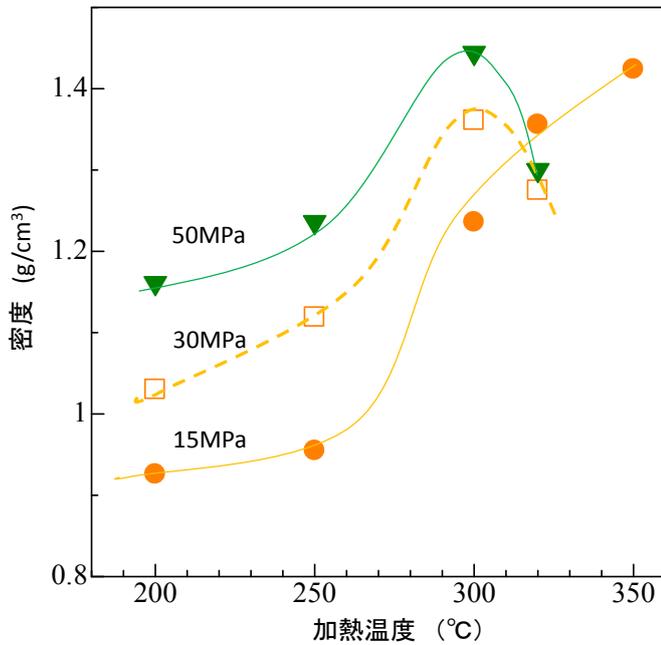


図 12 ナラ木粉にホットプレス処理を施した場合の成型体密度と加熱温度、加圧力の関係。

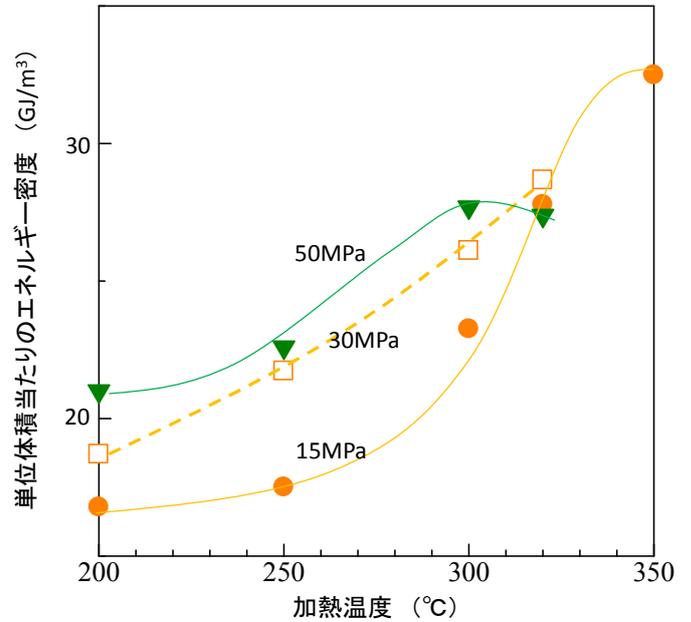


図 13 ホットプレス処理によりナラ木粉から作製した成型体のエネルギー密度（単位体積当たりの発熱量）に及ぼす加熱温度・加圧力の影響。

実験 2-2 ホットプレス処理が材料の構成元素に与える影響を調べる (CHN 分析).

【実験】

実験 2-1 で作製した成型体の元素分析 (CHN 分析) を行った. CHN 分析の手順は実験 1-3 と同様である.

【結果】

ホットプレスで作製した成型体の元素分析 (CHN 分析) を行い, C%から成型体の単位体積当たりのエネルギー密度を求めた結果を図 12 に示す. 得られた結果を以下にまとめる.

- ① 加熱温度が 320°C までの条件では加熱温度が高いほどエネルギー密度も高くなる.
- ② 同じ加熱条件下では加圧力が高いほどエネルギー密度が高くなる.

以上より, ホットプレス処理によって成型体の緻密化だけでなく, エネルギー密度の向上も図ることができることがわかった.

5 まとめ

本実験では, 身近に存在する木質系バイオマスが持つ熱エネルギーに着目し, (1) どの程度の発熱量を持っているのか, (2) エネルギー密度 (単位体積当たりの発熱量) を高めることはできるのか, という 2 点について調べた. 具体的には, 木質系バイオマスとして, タケ (マダケ) とナラを使用し, エネルギー密度を高める手法として加熱処理および加熱・加圧 (ホットプレス) 処理を採用した. 得られた結果を以下にまとめる.

1. 木質系バイオマスに加熱処理を施し燃料を得るという技術 (いわゆる炭化) は, 今もなお世界各地で利用されている技術である. しかしながらエネルギー密度という観点からは, 十分に炭化しない程度の温度域 (300 ~ 400°C 程度) での加熱処理が有効であることが分かった. また, 温度だけでなく保持時間も重要なパラメータである. 温度や時間を制御することで, 従来は離脱していた可燃成分 (ガスやタール) を試料中に留めることができる.
2. ナラを使用して加熱条件を検討した結果, 最高で 18GJ/m³ 程度のエネルギー密度を持つ試料を作製すること

ができた。この値は**一般的な薪の2.9倍、ペレットの1.5倍、石炭の2/3倍**に相当する。従来の炭焼き技術よりも低温かつ短時間の熱処理でエネルギー密度の高い燃料を創成できる可能性が見出された。

3. 木粉にホットプレス処理を施すことで、加熱だけでは得られない緻密な成型体が得られることが分かった。さらにこの成型体は高いエネルギー密度を示す。本実験では、 30GJ/m^3 程度のエネルギー密度が得られており、この値は石炭に匹敵する。

以上の結果を踏まえると、圧力、温度、時間、樹種などの最適化を図ることで、さらにエネルギー密度の高い燃料を創成することも期待できる。この技術を確立することができれば、身近に豊富に存在しながらも有効利用されていない木質系バイオマスを付加価値の高い燃料に変換することができる。また、この燃料は再生可能であり、CO₂の削減にも効果的である。

謝辞

本実験を遂行するに当たり、株式会社八光電機様から実験費の助成をいただきました。このような機会を与えていただきましたことに感謝します。

参考文献

- (1) バイオマスハンドブック, 社団法人日本エネルギー学会, オーム社
- (2) 木質資源とことん活用読本, 熊崎実/沢辺攻, 農文協