

初期投入粒径の低減によるリング媒体利用粉砕の省エネルギー化の検討

高橋武彦¹, 上松仁², 濱野美夫³¹ 秋田県立大学システム科学技術学部機械知能システム学科² 秋田工業高等専門学校物質工学科³ 秋田県立大学生物資源科学部フィールド教育センター

本研究では、リング媒体利用粉砕機における木質バイオマスの粉砕エネルギーを低減するために、リング媒体利用粉砕機を用いて粉砕前の投入粒径が粉砕に与える影響を調査した。粉砕に用いる杉粗粉末は、ハンマーミルを用いてメッシュサイズφ0.4 mm～1.6 mmのフィルターを通過できる程度に細かく粉砕し、リング媒体利用粉砕機での粉砕試験に供した。その結果、メッシュサイズφ0.4 mmの粗粉末においてスムーズなかさ密度の増加が確認できた。他の粉砕条件と比較すると、粉砕容器内の粉末の減容化を20分程度早くできる結果であった。この効果により60%程度のセルラーゼ糖化率に到達するために必要な粉砕時間も短縮でき、ハンマーミルでの粉砕エネルギーを加味してもトータルの粉砕エネルギーを低減できることが明らかとなった。

キーワード: リグノセルロース, バイオマス, 杉, 粉砕, 酵素糖化, 省エネルギー化

石油や天然ガスに過度の依存している現状において、その枯渇や気温上昇に対する不安により、資源を多様化すべくバイオマス資源を活用するバイオリファイナリーの研究が進められている。秋田県立大学では、バイオマス資源の1つである木質バイオマスにおいて粉砕前処理を効果的に実施できるリング媒体利用粉砕機（タンデムリングミル）を開発した（高橋ら, 2012）。

木質バイオマスおよび草本バイオマスは、おおまかにはセルロース、ヘミセルロース、リグニンから構成されている。牛などの反芻動物は、牧草、わらなどの草を微生物により有機酸に変換し、エネルギー源にできる。通常、木はルーメン内で消化されないため、飼料にはならない。しかし、タンデムリングミルで微粉砕して得られた杉粉末は、牛の消化率と近似できるセルラーゼ糖化率がホロセルロースベースで80%以上と高く、牛の飼料としても有望と考えられ木質バイオマスの飼料利用も検討されている（Hamano et al, 2017）。しかし、バイオリファイナ

リーや飼料への利用を想定した場合、全体としての生産コストの低減、その中でも粉砕コストの更なる低減が必要である。

本研究では、ハンマーミルを用いて準備した初期粒径の異なる粗粉末をHV30型タンデムリングミルで微粉砕し、その際の粉末の見かけの密度、メディアン径およびセルラーゼ酵素による糖化率を調査した。また、糖化に適する粉末に調製するための単位エネルギーを評価しその効果を検証した。その結果を報告する。

実験手順

粉砕試験に使用した杉粉末は、杉材チップをスチールプランテック製衝撃式粉砕乾燥装置 KDS-2 で粗粉砕と含水率調整を同時に行い含水率10～15%に調節しながら予備粉砕したのち、ハンマーミルにメッシュサイズφ0.4 mm, φ0.6 mm, φ1.2 mm, φ1.6 mmのフィルターを取り付けてさらに細かく粉

砕したものとした。以降、この粉末を 0.4mm 粉末、0.6 mm 粉末、1.2 mm 粉末、1.6 mm 粉末と表記する。実験に使用したリング媒体利用粉砕機は、HV30 型タンデムリングミルであり、構造およびリング媒体は既報と同様である（高橋ら、2016）。タンデムリングミルでの粉砕量は 1 バッチあたり 800 g とした。HV30 では 2 つの粉砕容器を用いるため 1 度に粉砕できる量は 800 g×2 となる。ハンマーミルでの粉砕、およびタンデムリングミルでの粉砕において、装置を動かしている際の電力を電力計により測定し、粉砕時の消費電力から粉砕に必要なエネルギーを評価した。

粉砕時にサンプル採取した粉砕粉末は、見掛けの密度測定、粒度分布測定、酵素糖化試験に供した。見掛けの密度測定は、粉末を圧縮せずに一定容量の容器に入れて、その重さを測定し単位体積当りの重さとして評価するゆるめかさ密度測定により実施した。粒度分布測定は、日機装製の Microtrac MT3300EX II で実施し、その分布からメディアン径を求めた。酵素糖化試験は、pH5.5 の 0.1M 酢酸バッファー溶液 2 ml に対し、杉粉砕粉末を 2 w/v%，セルラーゼ酵素の明治製菓ファルマ製メイセラゼを 0.1 wt%混合し、恒温振とう装置を用いて反応温度 50°C、振動数 200 rpm、反応時間 48 時間として実施した。糖量測定はシェールズ試薬法により行い、日立ハイテクノロジー製の分光光度計 U-3900H を用いて、波長 420 nm で評価した。また校正曲線にはグルコース検量線を用いた。

測定した糖量を基に杉粉末の酵素糖化率を評価した。酵素糖化率の定義は、杉粉末の組成をセルロース 39.6 %、ヘミセルロース 28.4 %、リグニン 31.5 % とし、このセルロースとヘミセルロースを合計したホロセルロース 68%を基準として酵素糖化試験で得られた糖量の割合とした。

実験結果

乾燥粗粉砕後の杉粗粉末をハンマーミルで粉砕した際の粉砕エネルギーを表 1 に、粉末の見かけの密度を表 2 に示す。

表 1 ハンマーミル粉砕における粉砕エネルギー

メッシュ径	粉砕エネルギー MJ/kg
φ 1.6 mm	0.33
φ 1.2 mm	0.49
φ 0.6 mm	1.26
φ 0.4 mm	1.28

表 2 ハンマーミル粉砕後の粉末の見かけの密度

メッシュ径	見かけの密度 kg/L
φ 1.6 mm	0.15
φ 1.2 mm	0.16
φ 0.6 mm	0.18
φ 0.4 mm	0.21

ハンマーミル粉砕に係るエネルギーは、粉末のサイズが細くなるほど大きくなり φ 1.6 mm のメッシュを通過させた 1.6 mm 粉末では 0.33 MJ/kg であったものが、φ 0.4 mm のメッシュを通過させた 0.4 mm 粉末では 1.28 MJ/kg となり、およそ 4 倍のエネルギーが必要となることがわかる。一方で、その見かけの密度は、KDS-2 で粉砕した直後の粗粉末において 0.12 kg/L 程度であったものが、ハンマーミル粉砕により調製した 0.4 mm 粉末では 0.21 kg/L とおよそ 2 倍の密度となっている。

次にタンデムリングミルでの粉砕結果について検討する。タンデムリングミルの粉砕容器は左右の 2 つであり微妙な粉砕挙動の違いも存在するため全く同一の粉砕状態とはならないが、その傾向は一致する。したがって、その粉砕状態を右側粉砕容器の粉砕結果を用いて説明する。図 3 にハンマーミル粉砕粉末をタンデムリングミルで粉砕した際の右側粉砕容器のメディアン径の変化を示す。1.2 mm 粉末を除き投入前のメディアン径によらず、粉砕時間 10 分において、50 μm 以下のサイズになっていることがわかる。その後は粉砕時間の増加に対してメディアン径が変化しない結果となった。

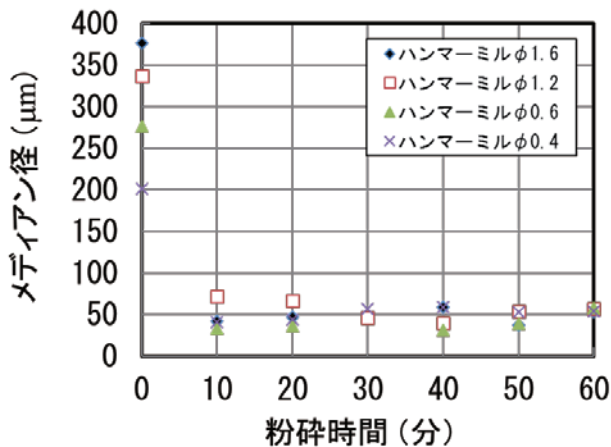


図3 粉砕時間ともなう粉末のメディアン径の変化 (右側粉砕容器)

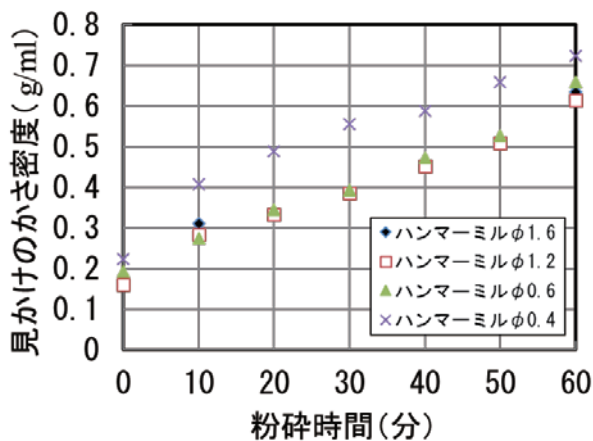


図4 粉砕時間ともなう粉末の見かけのかさ密度の変化 (右側粉砕容器)

図4にハンマーミル粉砕粉末をタンデムリングミルで粉砕した際の右側の粉砕容器における見かけのかさ密度の変化を示す。0.4 mm 粉末のかさ密度が他のものに比べて著しく増加していることが確認できる。粉砕時間で考えると、同等のかさ密度に到達する時間が20分程度短縮できていることになる。このことから、初期粒径を0.4 mm程度とすることで、容器内の粉末の減容化をスムーズに進めることが出来ると考える。また、この見かけのかさ密度の増加は、粉砕による粒子サイズの減少が落ち着いた後に粒子同士が凝集体を形成することで生じるものであり、タンデムリングミルにおける粉砕調製が効率的に進んだ結果と考えることができる。

図5にハンマーミル粉砕粉末をタンデムリングミルで粉砕した際の右側粉砕容器におけるセルラーゼ糖化率に変化を示す。右側の粉砕容器では、0.4 mm 粉末の粉砕において他の0.6 mm 粉末、1.2 mm 粉末、1.6 mm 粉末、より数ポイント高いセルラーゼ糖化率となっている。特に20分以降では0.4 mm 粉末から粉砕を行ったケースで、糖化率が他の条件より10分早い段階で同等の糖化率となり、粉砕時間の短縮できる効果が得られている。

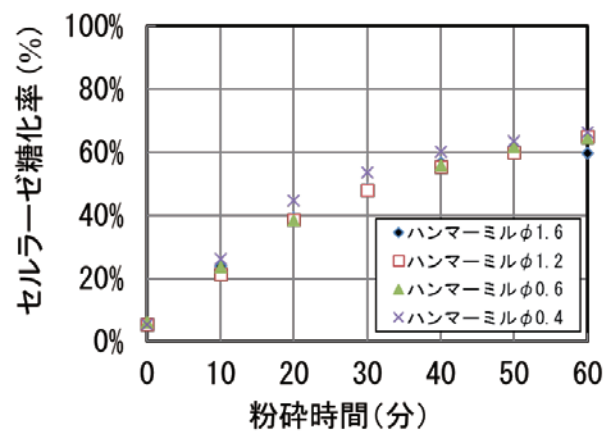
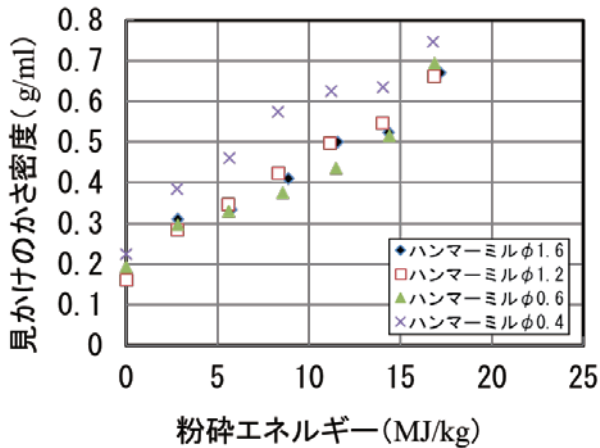
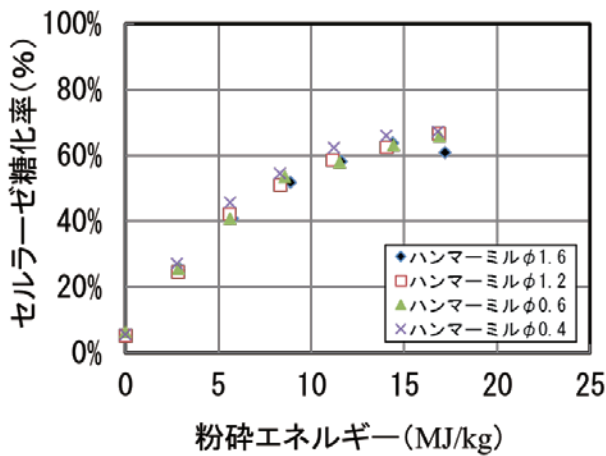


図5 粉砕時間ともなう粉末のセルラーゼ糖化率の変化 (右側粉砕容器)

図6に粉砕試験時に測定した消費電力を元に算出した粉砕エネルギーをベースとして、見かけのかさ密度、セルラーゼ糖化率を整理したものを示す。ここでの見かけのかさ密度、セルラーゼ糖化率は、右の粉砕容器と左の粉砕容器で別々の得られたデータの平均値で示している。通常、タンデムリングミルでは0.6 g/ml付近が粉砕で到達できる見かけのかさ密度となっており、0.4 mm 粉末から粉砕を行うことで、他の0.6 mm 粉末、1.2 mm 粉末、1.6 mm 粉末の半分程度の粉砕エネルギーで済むことがわかる。一方、セルラーゼ糖化率では、粉砕効率面を考慮するとタンデムリングミル粉砕ではセルラーゼ糖化率60%が目安となる。したがって、セルラーゼ糖化率が60%を越えるまでの粉砕エネルギーで比較すると、0.4 mm 粉末から粉砕を行うことで、他の粉末より3 MJ/kg程度少ない粉砕エネルギーで済むことが分かる。



(a) 見かけのかさ密度



(b) セルラーゼ糖化率

図6 粉砕エネルギーによる比較

ハンマーミルで 0.4 mm 粉末を調製するために必要な粉砕エネルギーが 1.28 MJ/kg 程度であり、ハンマーミルとタンデムリングミルを組み合わせた粉砕をおこなうことで、タンデムリングミル単独で粉砕を行う場合に比べて、粉砕エネルギーを低減できる。また、この減容化がスムーズに進む効果は、連続粉砕においてより効果的な現象であり、連続粉砕においてももっとも時間が必要となる粉砕初期の減容化に対して、投入サイズを 0.4 mm 程度にすることで粉砕効率を改善できるものと考えられる。

まとめ

本研究では、リング媒体利用粉砕において初期投入粒径を減少させることで、その粉砕性がどのよう

に変化するかを調査した。その結果、初期粒径を 0.4 mm のメッシュを通過できるサイズにすることで、減容化がスムーズに進行し、酵素糖化率を向上させるために必要な粉砕時間を低減できることが明らかとなった。また、エネルギーの削減効果も確認できた。

謝辞

本研究の一部は、秋田県立大学平成 28 年度 学長プロジェクト研究費「科研費チャレンジ研究」の支援、平成 28 年度 農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業の支援を受けて行った。ここに記して、謝意を表す。

文献

高橋武彦, 伊藤新, 遠田幸生, 伊藤一志, 小林淳一 (2012). 「木質系バイオマス微粉砕効率向上のための歯車型リング媒体利用粉砕機の研究開発」『日本機械学会論文集 (B 編)』78 (788) 905-916.

Yoshio Hamano, Takehiko Takahashi and Hitoshi Agematsu (2017). In vitro and in vivo ruminal fermentation of micronised wood powder for volatile fatty acid production in beef cattle, *Animal Husbandry, Dairy and Veterinary Science*, 1(2), 1-6.

高橋武彦, 森英明 (2016). 「リング媒体利用粉砕における粉砕容量が粉砕効率に与える影響の検討」『秋田県立大学ウェブジャーナル B (研究成果部門)』2, 6-10.

〔平成 29 年 6 月 30 日受付〕
〔平成 29 年 7 月 11 日受理〕

Study on Energy Saving Pulverization of a Vibration Mill Using Ring Media by Limiting Initial Powder Size

Takehiko Takahashi¹, Hitoshi Agematu², and Yoshio Hamano³

¹*Department of Machine Intelligence and Systems Engineering, Faculty of Systems, Science and Technology, Akita Prefectural University*

²*Department of Applied Chemistry, Akita National College of Technology*

³*Field Education and Research Center, Faculty of Bioresource Sciences, Akita Prefectural University*

In this study, in order to reduce the pulverizing energy of the lignocellulosic biomass in a vibration mill using ring media, we investigated the effect of pulverization on the reduction on initial powder size of Japanese cedar. The Japanese cedar coarse powder used for the pulverization test was finely pulverized using a hammer mill to pass a filter that has a mesh of between 0.4 to 1.6 mm in diameter. As a result, it was confirmed that the bulk density of pulverized powder drastically increased in the case of coarse powder passed through the 0.4 mm mesh size. Compared with other pulverization conditions, this increase in bulk density of pulverized powder was the result of a 20-minute shorter pulverization time required for increasing bulk density. The pulverization time required to reach the enzymatic saccharification efficiency over 60% shortened. Moreover, it was understood that the total pulverizing energy could be reduced by taking into consideration the pulverizing energy in the hammer mill.

Keywords: lignocellulosic biomass, Japanese cedar, pulverization, enzymatic saccharification, energy conservation