

## リング媒体利用粉砕機のkgクラス粉砕に向けた粉砕性能評価

高橋武彦<sup>1</sup>, 森英明<sup>1</sup><sup>1</sup> 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

秋田県立大学では、バイオエタノール製造のためのリグノセルロースの微粉砕前処理技術としてリング媒体利用粉砕機を開発している。この粉砕機は、既存の振動型粉砕機における粉砕媒体をリング型の粉砕媒体に替えたものであり、リングの転動運動による粉砕挙動により高衝撃な粉砕が可能である。本研究では、リング媒体を用いたkgクラスの粉砕を実現する大型化および連続粉砕化を検討するために製作した TR3000 型粉砕機において、粉砕性能を確認するバッチ粉砕試験を行った。その結果、5 kg を粉砕する粉砕試験で、20 分粉砕での平均粒径  $30\ \mu\text{m}$  への到達、80 分粉砕でのセルラーゼ糖化率 70% への到達など、リング型粉砕媒体による粉砕効果を確認できたが、粉砕量が 7 kg, 9 kg と増加すると粉砕効率が低下した。

**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, 粉砕スケールアップ

秋田県立大学では、木質バイオマスに対して物理的作用である粉砕前処理を効果的に実施するため、従来の振動ミルの粉砕媒体をリング媒体に替え、リングの転動運動により生じる大きな遠心力を利用して粉砕を行う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(2010)；高橋ら(2012)。タンデムリングミルでの粉砕により、杉はもちろんのこと、稲わら、もみ殻などの様々なバイオマスで、セルラーゼ酵素を用いた加水分解においてセルロース、ヘミセルロースを単糖に変換する割合である糖化率を高くできる結果を得ている；Takahashi et al (2014)。しかし、バッチ式であるため 1 回に粉砕できる量が 800g 程度と少なく、より多くの杉粉末の調製が可能な粉砕機の実現が望まれている。

我々の研究グループでは、タンデムリングミルの Kg クラス粉砕への大型化および連続粉砕化を検討するため、粉砕筒の内径は従来のバッチ式のタンデムリングミルと同等であるが、粉砕筒の長を 8 倍にして、連続粉砕の検討も行える TR3000 型タンデムリングミルを製作し、その性能評価を進めている。

本研究では、TR3000 型タンデムリングミルの粉砕性能の把握するため、バッチ式で粉砕量および粉砕媒体の枚数の差が粉砕結果に及ぼす影響を検討した。その結果を報告する。

## TR3000 型タンデムリングミルの概要

図 1 に TR3000 型タンデムリングミルの外観を示す。粉砕機は、上と下に取り付けられた粉砕筒 2 個、粉砕筒内に装填した粉砕媒体であるリング媒体、30 kW モータ 1 台、および 4 個のサポートスプリングで構成されている。図 2 に粉砕筒の構造とリング媒体の設置状況、およびリング媒体の寸法を示す。粉砕筒は、内径 279.7 mm、奥行き 1640 mm である。粉砕筒前後には、リング型粉砕媒体の軸方向への移動を抑制するスリットを挟み込む形で、投入口エンドカバー、排出口エンドカバーを取り付ける。リング媒体は、外径 248 mm、内径 190 mm、厚さ 21 mm で 2 mm 幅の歯付形状と歯無形状の 2 種類となっている。本研究では、上側粉砕筒に歯付リング媒体、

下側粉碎筒に歯無リング媒体を設置した．リング媒体は 77 枚を積層させて設置し，その積層厚さは 1617 mm となる．粉碎筒の奥行きが 1640 mm であるので，軸方向の総隙間は 23 mm となる．これらのリングは全て機械構造炭素鋼 S45C で作製されている．

本研究では，粉碎試験における回転数は 1537 rpm 一定として，ばね上全体の全振幅は 7 mm としている．また今回の粉碎試験では，バッチ式で実施するため粉碎筒の両端を円形のプレートで密閉した．

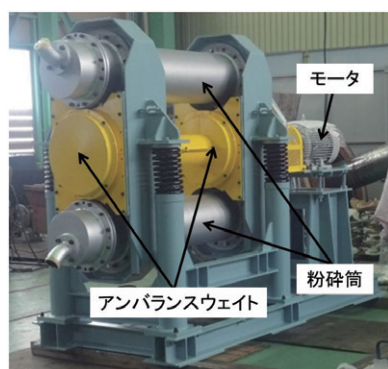


図1 TR3000 型タンデムリングミルの外観

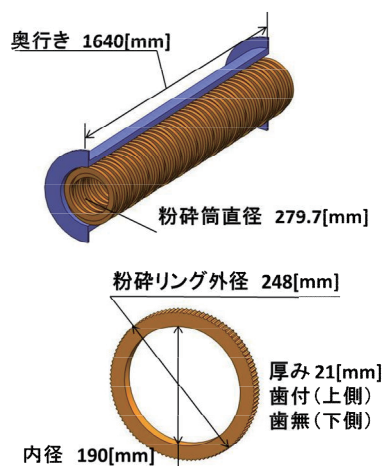


図2 粉碎筒の構造とリング媒体の設置状況および使用したリング媒体の寸法

### 実験手順

粉碎試験に使用するバイオマスは杉とし，粗粉末の粉碎調製したものを使用した．粗粉末は，杉チップを原料として乾燥粉碎装置 KDS-2 を用いて，粗粉

砕と含水率調整を同時おこない，粒径を 2 mm 以下，含水率を 15%程度に調整している．この杉粗粉末の見かけのかさ密度は 0.12 kg/L である

粉碎試験では，粉碎筒に投入する杉粗粉末の量を 5 kg, 7 kg, 9 kg として，粉碎量を変えた実験を行った．一つの粉碎筒の内容量は 68.5 L であり，杉粗粉末 5 kg の体積を見かけのかさ密度より算出すると 41.7 L となるため，粉碎筒への粗粉末充填率は 60.8 %となる．粉碎時間は，100 分として 10 分毎に粉碎サンプルを採取した．また，粉碎筒が 1640 mm と軸方向に長いため，軸方向での粉碎状態の違いが有ることを考慮し，粉碎サンプルの採取は，粉碎筒の両端（モータ側，反モータ側）から実施した．

粉碎試験により得られたサンプルは，粒度分布測定および酵素糖化試験により評価した．酵素糖化試験は，2mL 酢酸バッファーに対して杉 5 %，セルラーゼ酵素 (Novozymes 社製の Cellic® Ctec2) 0.1 % を混合し，50 °C の恒温槽に入れ，150 rpm の振とう下で 48h 反応させて行った．糖濃度の評価は，着色法の一つであるシェルーズ法により，グルコースを校正曲線として実施した．杉組成は，セルロース 39.6 %，ヘミセルロース 28.4 %，リグニン 31.5 % とし，残りは灰分である．この中で，セルロースとヘミセルロースが加水分解により単糖となる．本研究では，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%をベースとして，酵素加水分解により単糖が得られる割合を糖化率と定義した．

### 実験結果

図 3 に，粉碎量を 5 kg としたときの粉碎時間に伴う平均粒径の変化を，上側の粉碎筒のモータ側および反モータ側の両サイド，下側の粉碎筒のモータ側および反モータ側の両サイドで比較して示す．

粉碎量 5 kg での粉碎における平均粒径は，粉碎時間 20 分ほどで下げ止まりとなる 30  $\mu$ m 程度に到達し，その後凝集のためと考えられる平均粒径の増加が多少みられ，粉碎時間 100 分の時点では，50  $\mu$ m 程度の平均粒径となっている．また，上側粉碎筒，下側粉碎筒での傾向を比較すると，上側の粉碎筒のモータ側で時間によっては平均粒径の変化が大きい

ケースが見られるが、それ以外の粉砕時間では、粉砕筒のモータ側、反モータ側、および上側粉砕筒、下側粉砕筒で差がなく、同じように粉砕されていることが確認できる。

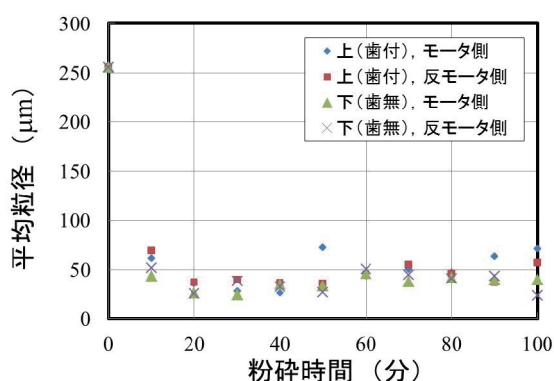


図3 粉砕量 5 kgにおける粉砕時間に伴う平均粒径の変化の上側粉砕筒、下側粉砕筒での比較

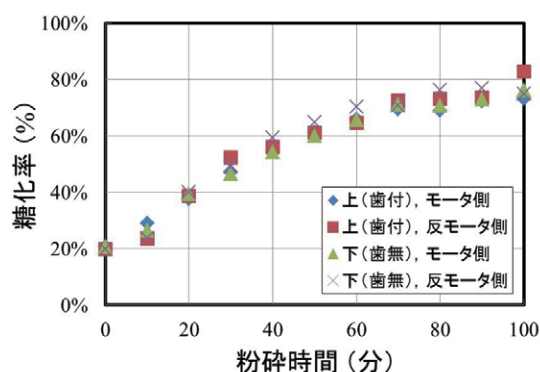


図4 粉砕量 5 kgにおける粉砕時間に伴うセルラーゼ糖化率の変化の上側粉砕筒、下側粉砕筒での比較

図4に、同じく粉砕量を 5 kgとしたときの粉砕粉末のセルラーゼ糖化率の変化の比較を示す。粉砕量 5 kgでの粉砕におけるセルラーゼ糖化率は、粉砕時間の増加とともに増加し、粉砕時間 80 分の時点で、セルラーゼ糖化率 70%に到達している。また、上側粉砕筒、下側粉砕筒での傾向を比較すると、平均粒径と同様に粉砕筒のモータ側、反モータ側、および上側粉砕筒、下側粉砕筒で差がなく、同じように粉砕粉末の糖化率が増加することが確認できる。この粉砕試験で、上側粉砕筒には歯付リング媒体が使用され、下側粉砕筒には歯無リング媒体が使用されてお

り、歯の有無による粉砕の差も見られない。以上より、TR3000 型タンデムリングミルで、粉砕量を 5 kgとした場合、歯の有無、粉砕筒の位置による粉砕効果の違いは無く、均一な粉砕が実現できる。

TR3000 型タンデムリングミルを用いた粉砕と従来のバッチ式 HV30 型タンデムリングミルの粉砕を比較し、その粉砕性能の違いを検討する。図5にTR3000 型タンデムリングミルを用いた粉砕と従来のバッチ式 HV30 型タンデムリングミルの粉砕における平均粒径の比較を、図6に糖化率の比較を示す。

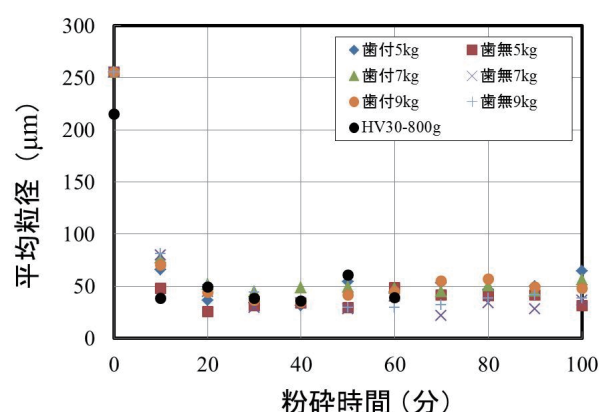


図5 TR3000 型タンデムリングミルにおける各粉砕量での粉砕に平均粒径の変化と、従来型のバッチ式 HV30 型タンデムリングミルでの粉砕結果の比較

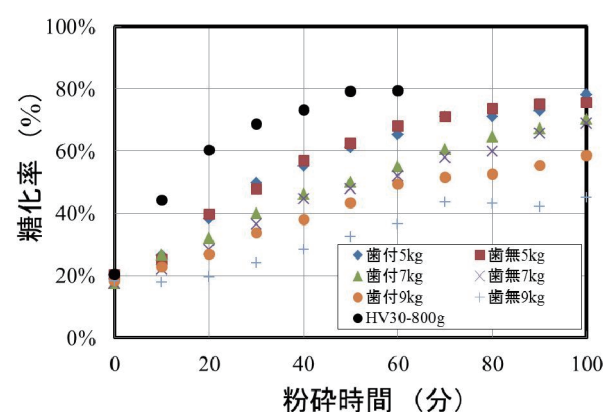


図6 TR3000 型タンデムリングミルにおける各粉砕量での粉砕にセルラーゼ糖化率の変化と、従来型のバッチ式 HV30 型タンデムリングミルでの粉砕結果の比較

ここで、TR3000 型タンデムリングミルの結果は、

粉碎筒のモータ側と反モータ側の結果の平均値としている。また、比較に用いた HV30 型タンデムリングミルの結果は、歯付リング媒体を用いて、加振回転数 1600 rpm, 全振幅 7mm の粉碎条件において 800g (粗粉末充填率 68.9 %) の粗粉末を 60 分粉碎したものである。TR3000 型タンデムリングミルでは、初期の 20 分から 30 分に間に、粉碎粉末の粒径が大きく減少していることがわかる。しかしその減少速度は、粉碎量が多くなると鈍くなっている。また、歯付リング媒体と歯無リング媒体による粉碎結果の違いは、粉碎量を増加させても明確な差としては現れない。一方で、HV30 型タンデムリングミルでは、初期の 10 分で平均粒径が下げ止まりとなる  $30\mu\text{m}$  付近まで到達している。しかし、粉碎量が増加により、60 分粉碎時点、100 分粉碎時点で到達できる糖化率が低下していくことが分かる。また、歯付リング媒体と歯無リング媒体による粉碎結果の違いは粉碎量 5 kg, 7 kg では見られないが、粉碎量 9 kg における糖化率の結果では、歯付リングと歯無リングの間に約 15 ポイントの差が開いた。したがって、粉碎量が多いほど歯付リング媒体の方が粉碎に有利に働くと考えられる。これらの結果を、HV30 型タンデムリングミルでの結果と比較すると、粉碎時間の増加にともなう糖化率の増加、および到達できる糖化率にかなりの開きがあることが確認できる。HV30 タンデムリングミルの結果と、粗粉末充填率が近い TR3000 型タンデムリングミルでの木粉 5 kg の結果と比較すると、HV30 型タンデムリングミルにおける粉碎粉末の糖化率は、粉碎時間 50 分で糖化率 80 % に到達するのに対し、TR3000 型タンデムリングミルでは糖化率 80 % に達するのに粉碎時間 100 分を要する。したがって、TR3000 型タンデムリングミルでは HV30 型タンデムリングと比べるとその粉碎性能は低いと考えられる。

この原因は、リング媒体とリング媒体の間に生じる隙間によるものと考えられる。この隙間は粉碎筒の軸方向長さとはリング媒体の積層厚さの差で与えられ、リング 1 枚当たりで計算すると、HV30 型タンデムリングミルでは、0.60 mm 確保されている。しかし、TR3000 型タンデムリングミルでは 0.3 mm と半分の隙間しか確保されていない。このため粉碎筒

内部での粉碎粉末の粉碎面への供給が制限され、粉碎効果が上がらなかったと考えられる。

## まとめ

TR3000 型タンデムリングミルにおいて、kg クラスの粉碎を実現するための粉碎性能を把握を、バッチ式粉碎試験により実施した。その結果、リング媒体による粉碎効果は、確認できたが、従来型のバッチ式 HV30 型タンデムリングミルで到達した粉碎効果には至らなかった。

今後は、リング間の隙間を維持しつつ、適切なリングの挙動が得られる粉碎の検討が必要と考える。

## 謝辞

本研究は、秋田県立大学平成 26 年度 研究シーズ活用・実用化事業の支援を受けて行った。ここに記して、謝意を表する。

## 文献

高橋武彦, 伊藤新, 遠田幸生, 伊藤一志, 小林淳一 (2010). 「木質系バイオマス微粉碎のための歯車型粉碎媒体利用粉碎機の研究開発」『日本機械学会論文集 (B 編)』76 (770) 1654-1660

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碎効率向上のための歯車型リング媒体利用粉碎機の研究開発」『日本機械学会論文集 (B 編)』78 (788) 905-916.

T. Takahashi, K. Ito, A. Ito, Y. Enda, M. Gochi, H. Mori, J. Kobayashi (2014). Tandem ring-mill pulverization benefits for enzymatic saccharification of biomass, *Renewable Energy*, 65, 146-151.

〔平成 27 年 6 月 30 日受付〕  
〔平成 27 年 7 月 31 日受理〕



## Evaluation of the Pulverization Performance of a Vibration Mill using Ring Media for Kilogram-scale Pulverization

---

Takehiko Takahashi<sup>1</sup> and Hideaki Mori<sup>1</sup>

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

A vibration mill referred to as “tandem-ring mill”, in which cog-ring media are used in place of the ball medium of a conventional vibration mill, was developed to achieve high-impact pulverization of lignocellulose biomass for bioethanol production. In this study, we investigated the pulverizing effect in batch pulverization tests using a TR-3000-type tandem-ring mill, which was manufactured to realize continuous, kilogram-scale pulverization. Japanese cedar powder samples were 5, 7, and 9 kg were enclosed in the mill as test samples. The mean particle diameter achieved in the tests was ~30 µm after 20 min of pulverization of a 5-kg sample, and the saccharification efficiency reached ~70% in the case of the 5-kg samples. However, the pulverization efficiency decreased with increasing mass of the enclosed powder.

**Keywords:** lignocellulosic biomass, Japanese cedar, pulverization, enzymatic saccharification, pulverization scale-up