Original Paper

Special articles : Biomass

特集：バイオマス

Efficient Pulverization Technique of Woody Biomass
by a Multiple Tube Vibration MillNobusuke KOBAYASHI[†], Yasuharu SAKAKURA, Yasuhiro TANABE, and Yoshinori ITAYA

(Received February 24, 2011)

多筒型振動ミルを用いた木質バイオマスの高効率微粉碎技術

小林信介[†], 坂倉慶春, 田邊靖博, 板谷義紀

In order to reduce consumed energy during woody biomass pulverization process and increase production rate of woody biomass powder, new pulverization pot for the vibration mill was developed. Multiple tube pot, arranged same small size tubes in parallel, was newly-designed, and various sizes of pulverization pot were also prepared for the pulverization experiment. In this experiment, effect of the pot size and the number of tubes of the pot on pulverization ability, such as pulverization particle size, crystallinity index of cellulose, consumed energy and productivity of woody powder, was evaluated. Pulverization ability in a large scale multiple tube vibration mill was also estimated in this paper. The number of tubes was completely unrelated with pulverization ability, when the size of tubes was same, in a multiple tube vibration mill. On the other hand, pulverization rate was significantly influenced by the pot diameter, and the pulverization rate of smaller pot was much faster than bigger diameter pot. Therefore, production of woody power was able to increase by using multiple small size tubes pot, and newly-developed multiple tube pot was also capable of reducing consumed energy per woody powder production significantly.

Key Words

Woody biomass, Pulverization, Multiple tube pot, Vibration mill, Production rate, Consumed energy

1. 緒 言

粉碎は木質バイオマスの利活用において必要不可欠なプロセスであり、利用する木質チップ・木粉の大きさはバイオマス利活用におけるプロセス全体の効率を大きく左右する。例えば、バイオエタノール生産における糖化前処理やガス化等における原料木粉の微細化は木粉の反応性が向上することからプロセスの効率化において優位に働く¹⁾²⁾。しかし、木質バイオマスの微粉碎には莫大なエネルギーを消費し、粉碎に必要なエネルギーは木粉の微細化とともに指数関数的に増大する¹⁾³⁾。そのため粉碎プロセスにおける消費エネルギーの削減が強く望まれており、近年では微粉碎装置の省エネルギー化に関する数多くの研究開発が実施されている^{4)~6)}。

このような状況の中、著者らは効率的かつ経済的な粉碎プロセスを構築することを目的として、連続生産可能な振動ミルを用いた微粉碎プロセスについて検討を行い、装置のスケールアップを行うことで木粉生産量の増大および省エネ

ジー化を図ってきた⁴⁾⁷⁾。従来型の連続振動ミルにおいては粉碎容器のスケールアップ（筒径を大きくすること）により生産量を大幅増大させることが可能であることから生産量の増大に伴うエネルギー原単位の削減が期待されていた。しかし、実際の粉碎容器大型化においては粉碎容積当たりの粉碎木質量が多くなるため粉碎速度が大幅に低下し、粉碎容器の径を大きくするだけでは生産量当たりのエネルギー消費量を削減できないことが明らかとなっている。それに対して容器径を固定し、粉碎容器の長さだけ長くする場合には、粉碎速度を低下させることなく、また連続装置においては長い粉碎（滞留）時間を確保できることから単位木粉生産量当たりのエネルギー消費量が削減可能であることも明らかとなっている。しかし、粉碎容器長さのスケールアップについては装置設計の観点から技術的な限界があり、また粉碎容器を長くするだけでは粉碎容量の大幅な増大が図れないため微粉碎木粉の大量生産は難しく、従来型振動ミルのスケールアップにおいて

Department of Chemical Engineering, Nagoya University
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi 464-8603, Japan

[†] Corresponding Author: nsuke@nuce.nagoya-u.ac.jp

名古屋大学大学院工学研究科
〒464-8603 名古屋市中種区不老町

生産量の増大と消費電力量の削減を両立させることは極めて困難であった。

そこで本研究では振動ミルの生産性と粉碎性、両パラメーター双方の向上を目的とし振動ミルの改良を行い、改良型振動ミルを用いて木粉生産量の拡大と消費エネルギーの削減について検討を行った。改良型振動ミルは粉碎速度の向上を図るため粉碎容器の径を小径で一定とし、その上で木粉生産量を増大させるために小径の粉碎容器の数を複数並列に束ねた多筒型の粉碎容器を有している。実験では新たに作製した多筒容器を用いて木質バイオマスの粉碎を行い、筒径や筒数が粉碎性や生産性に与える影響について検討した。また、粉碎実験により得られた結果を用いて多筒型振動ミルスケールアップ時の生産速度および消費電力量について推算を行なった。

2. 実験方法および計算方法

2.1 多筒容器を用いた粉碎実験

今回の木質バイオマスの微粉碎実験においては回分式振動ミル (Chuo Kakohki, MB-1) を用いた。旋回ミル (Steal Plantech, KDS) で二次粉碎を行なった岐阜県産スギ木質部ピンチップ、含水率約 20% を 353 K で 48 時間乾燥した後、1 mm 以下に分級したものを本粉碎実験での原料木粉とした。乾燥後の原料木粉含水率は湿潤基準で約 3 % であった。従来型振動ミルに使用されている単筒容器および今回新たに作製した多筒容器の断面図を Fig. 1、それぞれの容器寸法および重量を Table 1 に示す。多筒型の粉碎容器は、従来の連続振動ミル、直列 2 筒式に対して小径で同じ長さの筒型粉碎容器複数を 1 つに束ねた並列多筒容器である。実験では筒径の異なる 4 つの粉碎容器を準備し、 $\phi 66$ mm、 $\phi 74$ mm の粉碎容器についてはそれぞれ 4 筒、3 筒を一つに束ねた多筒型粉碎容器を使用した。ただし、多筒型の粉碎容器はそれぞれの容器が固定してあるため粉碎時に容器自身が回転することはない。また d107 の容器だけ筒長さが異なっていることに注意を要す。それぞれの粉碎容器には一定量の粉碎媒体および原料木

粉を充填し、すべての粉碎実験において振動ミルの振幅は 9 mm、振動数は 60 Hz の一定条件で粉碎を行なった。粉碎媒体には 13 - 19 mm (1/2 - 3/4 inch) のステンレス製ボールを用いた。粉碎媒体の充填量については予備粉碎実験の結果から容器体積比 8 割 (嵩基準) のボール充填量が最も効率的に粉碎可能であることから本実験においても同様とした。今回の粉碎実験においては各粉碎容器における原料木粉の充填重量を粉碎媒体重量の 0.5 - 2 % とし、粉碎時間は 3 min から 20 min で変化させた。粉碎木粉の粉碎性は得られた木粉の粒度およびセルロース結晶化度により評価を行い、省エネ化および生産性の観点から粉碎時の平均消費電力および木粉生産量についても測定を行った。粒度分布測定にはレーザー回折/散乱式粒子径分布測定装置 (Horiba, LA-920)、セルロースの結晶化度については X 線回折装置 (Shimadzu, XRD-6100) を使い、測定を行なった。粒度測定においては湿式法を採用し、粒度測定前に 2 分間の超音波照射を行うことで凝集粒子の解砕を行なっている。セルロース結晶化度は X 線回折装置より得られる $2\theta = 18^\circ$ および 22° 付近の回折強度より Segal 法⁸⁾ を用いて算出した値とした。原料木粉のセルロース結晶化度はサンプリングにより若干のバラツキはあるものの、その値は約 50% であった。多筒容器により得られる粉碎木粉の粒度およびセルロース結晶化度についてはそれぞれの容器で得られた木粉分析値の相加平均で示した。粉碎時の消費エネルギーについては粉碎開始から粉碎終了までの消費電力実測値を用いて算出を行った。ただし、消費電力の値には粉碎装置全体を動かすために必要なベース電力も含まれていることに注意を要す。粉碎により粉碎木粉の含水率は減少するが、本実験結果における木粉生産量については、すべて含水率 3 % 基準でセルロース結晶化度 10% の木粉重量を示している。

本研究では多筒容器における粉碎媒体挙動についても検討を行った。容器内が目視できるようアクリル板を容器側面に取り付けた粉碎容器を準備し、粉碎容器に 19 mm ボールのみを充填した状態で粉碎器を振動させ、容器壁に沿って円運動するボールの動きを容器側面よりビデオ撮影することで筒壁に沿って円運動するボールの速さを測定した。ボールの円運動する速さは角速度として算出し、得られた角速度をそれぞれの容器における粉碎媒体の挙動として評価を行った。振幅、振動数、媒体充填率等の粉碎条件は上述した粉碎実験と同様とした。

Fig. 1 Cross-section diagram of different pots

Table 1 Specification of pulverization pots and pulverization condition

Pot type	d66	d74	d107	d145	d74x3	d66x4
Pot diameter [mm]	66	74	107	145	74	66
Number of pots [-]	1	1	1	1	3	4
Pot length [mm]	225	225	125	225	225	225
Total ball weight [kg]	2.69	3.39	4.10	13.0	10.2	10.8
Initial woody powder weight [kg]	0.027	0.034	0.041	0.130	0.102	0.108
Total weight [kg]	10.4	11.4	8.6	25.0	20.0	22.2

* Total pot weight [kg] = Total weigh [kg] - Total ball weight [kg] - Initial woody powder weight [kg]

2.2 多筒型振動ミルのスケールアップ推算

複数の小径粉碎容器を配列した多筒型振動ミルを想定し、大型装置における微砕木粉の生産速度および消費電力量について推算を行なった。計算を行なった多筒型粉碎容器模式図を Fig. 2 に示す。多筒型振動ミルのスケールアップでは同一径の粉碎容器筒数を増やしていくため、筒数が増えるとともに多筒容器全体の径は大きくなる。スケールアップ計算は小径粉碎容器を複数個蜂の巣状に束ねた多筒型容器と従来の単筒円筒型粉碎容器の2種類について行なった。多筒型容器のスケールアップ計算では筒数および筒長さを変化させ装置のスケールアップを図り、単筒型の場合には筒径および筒長さを覚えて粉碎容器の大型化を図っている。両装置の性能を比較するため、多筒型の計算においては107 mm 小径容器を複数本束ねた多筒容器全体が外接する円の直径を単筒型における容器の直径に相当するものとしている。粉碎容器を複数個束ねた多筒容器の筒数と相当直径の関係、および筒長さを Table 2 に示す。今回のスケールアップ計算では筒長さは相当直径の6倍に比例するものとした。これは従来型連続振動ミルにおける経験的スケールアップ倍率である。相当直径の算出においては容器の壁厚さを無視して計算を行なったため、直径107 mmの容器を37本束ねた場合、その相当直径は722 mm となり、筒長さについては4334 mmとなる。粉碎容器重量については別途計算を行っており、ステンレス容器の総重量については容器内径より求まる総表面積を計算し、単位面積当たりの重量 73.3 kg/m² を総表面積に掛けて算出を行った。粉碎実験同様、スケールアップ計算においても粉碎媒体には19 mmのステンレス製のボールを用い、容器体積の8割を占めるようにボールを充填する。ボール総充填重量はステンレスボールの嵩比重4600 kg/m³を用いて算出を行った。原料木

粉には回分式振動ミルにおける粉碎実験と同様1 mmに分級したピンチップを想定し、各筒内の充填木粉量は粉碎媒体重量の1%，振動ミルの振幅は9 mm，振動数は60 Hzとすることでスケールアップした場合においても回分式振動ミルでの実験と同様の粉碎性が発揮されるものとした。スケールアップ計算においては微砕木粉の生産速度および単位微砕木粉当たりの消費電力量（エネルギー原単位）を算出した。木粉生産量は粉碎実験同様セルロース結晶化度10%の粉碎木粉の重量とし、生産速度は各容器に充填した原料木粉の重量を粉碎時間で除すことで算出を行った。ここで、容器内の木粉原料充填量は粉碎媒体重量の1%であり、粉碎時間はセルロース結晶化度10%にするのに必要な時間である。粉碎時間については後述する粉碎実験より得られた実験値を計算に用いた。また、今回のスケールアップ計算においては粉碎による粉碎木粉の含水率変化は無いものと仮定した。消費電力については装置重量に比例する実験値より外挿し算出を行なった。ここで装置重量とは粉碎容器重量、充填粉碎媒体重量および原料木粉重量の合計である。

3. 結果および考察

3.1 多筒容器を用いた粉碎実験

Fig. 3 に各種粉碎容器を用いて微粉碎実験を行なったときの粉碎時間と粉碎木粉のセルロース結晶化度の関係を示す。図には筒径 375 mm の振動ミルを用いて同条件で粉碎を行った前報⁷⁾の結果も参考値として併せて示した。充填したボール径は19 mm，原料木粉充填量は粉碎媒体重量の1%である。筒径や筒数に関わらずセルロース結晶化度は粉碎時間に対して一定割合で減少し、セルロース結晶化度10%以下で次第に結晶化度の減少速度は低下する。これはセルロース結晶の破壊

Fig. 2 Diagrammatic illustration of a multiple tube vibration mill; diameter of each pots is 107 mm, the number of pots is 1 to 91, and the length of pot is equivalent diameter times 6. In the scale-up simulation, pot diameter of single tube vibration mill equals equivalent diameter of multiple tube vibration mill

Table 2 Calculation condition of a large scale multiple tube vibration mill

Number of pots, n [-]	1	3	7	19	37	61	91
Equivalent diameter [mm]	107	230	321	520	722	927	1134
Pot length [mm]	642	1380	1926	3120	4334	5560	6805
Initial woody powder weight [kg]	0.2	1.4	4.5	19.6	53.1	112.2	204.9
Total weight [kg]	38.6	244	792	3468	9360	19775	36082

Total ball weight [kg] = 100 × Initial Woody powder weight [kg]

Total pot weight [kg] = Total weight [kg] - Total ball weight [kg] - Initial woody powder weight [kg]

Fig. 3 Crystallinity index of cellulose against pulverization time in different pots; Ball size: 19 mm; Filling ratio of woody biomass: 1%

には粉碎時間、つまり一定量の粉碎エネルギーを木質バイオマスに加え続けなければならないことを意味している。ただし、筒径によりセルロース結晶化度が減少する速さは異なっており、筒径が小さい方が短時間でセルロース結晶化度が低下する傾向が見られるが、本粉碎条件においてはd107による粉碎性が最も高かった。セルロース結晶化度を10%にするために必要な時間を比較してみるとd145の21 minに対してd107では約11 minであり、筒径が約3/4になるとセルロース結晶破壊に必要な時間は半分程度になっている。図における原料木粉の結晶化度50%から微粉碎木粉のセルロース結晶化度10%までの粉碎時間に対するセルロース結晶化度の傾きをその粉碎容器における粉碎速度と定義すると、今回の粉碎条件における粉碎速度への影響因子は筒径だけであり、筒数による粉碎速度への影響はほとんど見られなかった。また、多筒容器における各々の容器の粉碎速度についても大きな違いが無いことが分かった。

筒径が小さい方が粉碎速度は大きくなる傾向は見られるものの、上述したように今回の粉碎条件においてはd107が最も効率的にセルロース結晶が破壊されている。これはFig. 4に示すように筒径に対して最適な粉碎媒体径（ボール径）があるためである。図はステンレスボールを容器に8割充填し、木粉投入量、振幅、振動数などの粉碎条件を一定として10分間粉碎を行なった場合のボール径に対する微粉碎木粉のセルロース結晶化度を示している。図に示すように筒径により最適なボール径は異なっており、筒径が小さい場合には小さいボール径の粉碎媒体の方が粉碎性は良い傾向にはある。ただし、ボール径が小さすぎるとボール一個当たりの重量が小さくなることから粉碎力は低下し、木質バイオマスのセルロース結晶の破壊効果が低下する。一方、筒径に対してボール径が大きくなり過ぎると筒内でのボールの動きが悪化するため粉碎性が低下することになる。

Fig. 5に粉碎時間に対する粉碎木粉の平均粒径の関係を示す。比較のため前報⁷⁾ 筒径375 mmの場合の結果も併せて示した。セルロース結晶化度で見られた傾向と同じく、粉碎時間が長くなるとともに平均粒子径は小さくなり、筒径が小さ

Fig. 4 Effect of ball size on crystallinity index of cellulose with different pots; Filling ratio of woody biomass: 1%; Pulverization time: 10 min.

Fig. 5 Median diameter of woody powder against pulverization time in different pots; Ball size: 19 mm; Filling ratio of woody biomass: 1%

い方が粉碎時間に対する平均粒径の減少速度が大きい傾向がみられた。ただし、19 mmのボールを使用した本実験においては上述した理由によりd107が最も効率的に粒径が小さくなっていた。平均粒径の減少割合については、時間に対して一定ではなく、粉碎初期段階で大きく、粉碎時間が長くなると平均粒子径は粉碎容器によらずほぼ一定値に漸近する。最終的に粉碎可能な木粉粒子径（粉碎限界粒径）はボール径に強く依存することが知られているが、19 mmのボールを用いた場合の限界粒径は50 μm程度であると考えられる。木粉を微細化する速さは相対的にセルロース結晶を破壊する速さよりも速く、d145でも15程度でほぼ粉碎限界粒径に達しており、筒径の大きさが粒度に与える影響は、筒径がセルロース結晶の破壊へ与える影響ほどは大きくはないものと推測される。筒径が同じ場合には、筒数が異なっても粉碎木粉の粒度が変わらないことから筒数が微粉碎木粉の平均粒径に与える影響は小さく、また各筒においても粒度には違いが無いことが明らかとなった。

上述したように粉碎木粉のセルロース結晶化度および平均粒子径で評価した木質バイオマスの粉碎性については筒径が同じ場合、筒数に影響されないことが明らかとなった。これは、振動ミルの容器に充填された粉碎媒体は容器の中心を軸

にして円運動しており、容器が複数である場合においてもそれぞれの容器の中心軸で同じように円運動していると考えられるためである。Fig. 6に多筒および単筒における筒内のボール回転速度を示す。19 mmボールを使用した今回の実験条件においては筒径が小さいほど速い角速度を示しているが、d66, d74 容器の単筒および多筒のそれぞれの容器においてボール回転速度は全く変わっていないかった。粉碎媒体のみを充填して観察を行っているため、実際に木質バイオマスを粉碎しているときのボール挙動は全く異なるものと考えられるが、本実験結果から多筒の各容器における粉碎挙動は各々の容器において変わらないことが予想され、結果的には粉碎性は筒数に影響されないものと推測できる。

多筒における原料木粉投入量に対するセルロース結晶化度についても評価を行なうため原料木粉の充填量を変えてd74およびd74×3容器を用いて粉碎実験を行なった。Fig. 7に原料木粉投入量とセルロース結晶化度の関係を示す。この実験での粉碎時間は10分間、粉碎ボール径は19 mmである。1筒当たりの木粉投入量は同じである場合d74×3はd74の3倍の微細木粉が生産可能となる。単筒および多筒において木粉量とセルロース結晶化度の関係を比較すると1筒当たりの原料木粉量が同じである場合、セルロースの結晶化度は単筒および多筒においてほとんど変わっておらず、その粉碎性には違いはない。1筒当たりの原料木粉投入量が増えればその粉碎性は悪くなるが、それぞれの筒においてセルロース結晶化度の値は単筒の場合と多筒の場合で同じであるため多筒における処理量は倍増することになる。また、単筒に50 gの原料木粉を充填した場合と原料木粉50 gを3筒に分散し粉碎を行なった場合、得られる微細木粉のセルロース結晶化度は大きく異なり、同じ生産量であれば多筒にした方がセルロース

結晶化度を速く小さくすることが可能となる。そのため木質バイオマスの微粉碎において生産性および粉碎性、双方の観点から振動ミルに多筒容器を採用することのメリットは極めて大きいものと判断できる。

多筒容器を用いて木質バイオマス微粉碎を行なった場合の粉碎性能について粉碎速度、生産速度、平均消費電力および単位生産量当たりの消費電力量の観点から評価を行い、その結果をTable 3にまとめて示した。この実験における粉碎ボール径は19 mm、原料木粉充填率は1%である。生産速度はセルロース結晶化度10%の微粉碎木粉の時間当たりの生産量を表しており、また粉碎時の消費電力は木質バイオマスの粉碎状況や粉碎媒体の動きにより変化するため実測値の平均を示している。粉碎速度は筒径の大きなd145に対して筒径の小さなd66, d74, d107の方が大きくなっている。ただし、19 mmのボールを使用した今回の粉碎条件においてはd107が最も良い粉碎性能を示していた。d66およびd74のように筒径は同じでも筒数が異なる場合には筒数に関わらず粉碎速度はほぼ一定の値となっており、筒数が増えることにより粉碎性能が低下するようなことはない。単位時間当たりの木粉生産量については筒径が大きくなるほど充填可能な原料木粉量が増えるため見かけ上生産量は多くなる。多筒容器を用いた場合においても充填可能な原料木粉量は筒数とともに増加するが、それに加え粉碎速度が筒径の大きいものよりもはるかに速いことから生産速度は大幅に増大する。そのため筒径のスケールアップにより得られる効果よりもより大きな相乗効果が多筒容器を使用することにより得られることになる。消費電力については筒径や筒数が増加するとともに粉碎容器重量および粉碎媒体重量が増加するため粉碎時の平均消費電力は大きくなる。ただし、d107容器については他の容器と比べて容器長

Fig. 6 Rotation velocity of pulverization ball with different pots; Ball size: 19 mm

Fig. 7 Crystallinity index of cellulose in single pot and multiple tube pot; Ball size: 19 mm; Pulverization time: 10 min

Table 3 Pulverization performances with different pots

Pot type	d66	d74	d107	d145	d74x3	d66x4
Pulverization rate [s^{-1}]	3.1	3.5	3.8	1.9	3.3	3.0
Production rate of woody powder [kg/h]	0.12	0.18	0.23	0.38	0.50	0.48
Consumed electricity [kW]	0.32	0.34	0.42	0.53	0.56	0.59
Consumed energy per production [MJ/kg]	9.50	6.77	6.59	5.04	3.96	4.39

さが短いため生産量に対する消費電力量の関係は他の容器と若干異なっている。また、今回の粉碎実験においては同じモーターを搭載した振動ミルを使用しているため装置を振動させるために必要なベース電力は粉碎容器重量にかかわらず同じであり、そのベース電力量は粉碎容器重量の増加による消費電力増加量よりも大きい。そのため容器重量の増加に伴う消費電力の増加割合は木粉生産量の増加割合に比べて小さく、今回の単筒粉碎実験条件においては筒径が大きくなると木粉生産量当たりの消費電力量は小さくなる傾向にあった。多筒容器を用いた場合には生産量が大幅に増大することから生産量あたりの消費電力量の削減効果はさらに大きくなっており、生産量の大幅増大だけでなく、多筒容器を用いることにより消費エネルギーの大幅削減も可能であることが示唆された。

3.2 多筒型振動ミルのスケールアップ推算

上述してきたように筒径が同じである場合、単筒、多筒によって木質バイオマスの粉碎性は変わらない。そのため筒数を増やす多筒容器のスケールアップを行なった場合には微細木粉生産量の増大、またそれに伴う消費電力量の削減効果は極めて大きいものと予測できる。そこで多筒型振動ミルのスケールアップによる生産速度および消費電力量の変化について推算を行なった。また単筒型振動ミルのスケールアップについても計算を行ない単筒型および多筒型振動ミルで粉碎性能の比較を行なった。微碎木粉の生産速度は筒径により単筒型容器と多筒型容器で大きく異なることが実験より明らかになっているため、単筒、多筒で異なる計算方法を用いた。多筒型振動ミルについては筒数、また筒長さにより粉碎速度は変化しないことが本実験および既往の実験⁷⁾より明らかなことから、多筒型ミルによる生産速度は今回の実験条件において最も効率的に粉碎が可能であった 107 mm 容器の粉碎速度実験値 0.063 h^{-1} を使用し、各筒の生産速度を筒数倍することで算出を行なった。単筒スケールアップの場合、筒径が大きくなるとともに粉碎速度が低下することから筒径に対する粉碎速度の低下割合を考慮し生産速度の算出を行なっている。筒径と粉碎速度の関係については前報⁷⁾で得られた経験式を利用した。Fig. 8に粉碎容器スケールアップを行なった場合の

多筒容器の相当直径および単筒容器の筒径に対する木粉生産速度を示す。単筒の場合には筒径が大きくなるとともに粉碎速度が著しく低下することから筒径が大きくなり粉碎容器体積が増加したとしても木粉生産量の伸びはわずかとなる。一方、多筒型振動ミルをスケールアップした場合、粉碎速度は相当直径に関わらず一定であることから容器の相当直径が大きくなるとともに生産量は大幅に増大する。そのため容器相当直径約 90 cm までスケールアップを行なった場合には時間当たり 650 kg の木粉が生産可能となる。ただし、本計算における粉碎容器の筒長さは筒径の 6 倍と設定しているが、筒長さと筒径のスケールアップ倍率により粉碎容積が大きく変化し、それに伴い木粉生産量も大きく異なる。相当直径および筒長さに粉碎速度が無関係である多筒振動ミルの場合には相当直径および筒長さのスケールを大きくすることにより生産量の増大が図れる。ただし相当筒径を大きくする方が容器体積の増加率が大きくなるため生産量の増大率も大きくなる。一方、筒径により粉碎速度が大きく変化する単筒の場合には筒径を大きくするよりも粉碎性に影響がない筒長さを長くする方が生産速度は大きくなることを付け加えておく。

粉碎時の消費電力については装置重量により大きく異なることが知られている。装置重量と消費電力実測値の関係を Fig. 9 に示す。図には既往の研究⁴⁾⁷⁾による装置重量に対する粉碎時消費電力実測値も併せて示した。装置の重量により異なる出力のモーターを使用することになるが装置重量と消費電力には概ね図のような相関性がある。そのため、スケールアップ時の電力量計算においてはこの関係を利用した。ただし、ここでの電力には粉碎機を振動させるためのベース電力を含んでいる。スケールアップ時の消費電力は装置重量に比例としているため、筒径が大きく、また筒長さが長くなるとともに装置重量は重くなり、消費電力も増大する。多筒の場合には筒径の小さい容器を並列に積み重ねるため同筒径における装置重量は円筒容器間の空隙を除いたとしても単筒スケールアップの場合よりも重くなる。またスケールアップによる重量増加割合は筒長さよりも筒径を大きくする方が大きくなるため、筒径を大きくした方が消費電力の増加割合も大きくなる。

Fig. 8 Production rate of woody powder of single and multiple pot in a scale-up simulation

Fig. 9 Relationship between total weight of pot and consumed electricity

Fig. 10 Consumed energy per woody powder production of single and multiple pot in a scale-up simulation

Fig. 10に単筒および多筒におけるスケールアップ時のエネルギー原単位を示す。単筒のスケールアップにおいては前報⁷⁾の結果からも明かなようにスケールアップによる粉碎容積の増加に対して木粉生産量は著しく小さく、また装置重量の増加に伴う消費電力量の大幅な増大から装置をスケールアップすることによりエネルギー原単位は急激に増大する。一方多筒容器のスケールアップでは装置のスケールアップにより木粉生産量が増大することからエネルギー原単位は減少する。さらにスケールを大きくした場合には生産量の増加と消費電力量の増加がバランスしエネルギー原単位の変化はほぼ見られなくなり、今回のスケールアップ条件においては1 MJ/kgではほぼ一定値となった。生産量と消費電力量は容器サイズにより大きく変化することから、エネルギー原単位もスケールアップ倍率(筒径と筒長さの割合)により大きく変化する。多筒容器において生産量が大幅に増大する筒径方向のスケールアップはエネルギー原単位を減少させる一つの方法ではあるが、同時に粉碎時の消費エネルギーも大幅に増大するため、生産性とエネルギー効率に優れた大型粉碎装置を設計する際には粉碎条件と併せてスケールアップ倍率の最適化が必要不可欠となる。今回の多筒型振動ミルの粉碎実験およびスケールアップの推算においては円筒型を想定したが、実機においては円筒容器を矩形状に配列した振動ミルなども考えられ、今後は装置設計を含めて多筒型振動ミルの木質バイオマス粉碎における工夫と技術開発が必要である。また、目的とする微粉末粉性状によっても粉碎条件やスケールアップ条件は大きく異なるため、今回のように粉碎によるセルロース結晶の破壊が目的ではなく、50 μm の粒子を製造することが目的である場合には、セルロース結晶の破壊よりも粒度を小さくする方法が比較的容易であり、さらに効率的に木粉の生産が可能になるものと考えられる。

4. 結 言

木質バイオマスの微粉碎における効率化を目的として、単位時間当たりの生産量および単位生産量当たりの消費電力量の双方に優れた多筒型振動ミルの開発を行った。従来の単筒型粉碎容器に対して多筒型粉碎容器を採用した場合、筒径が同じであれば、単筒、多筒において平均粒径およびセルロース結晶化度で評価を行なう木質バイオマスの粉碎性には全くかわりがないことが明らかとなった。

粉碎実験の結果より多筒型振動ミルのスケールアップにおける生産速度および消費電力量を推算し、単筒スケールアップに比べて多筒容器の大型化は生産速度を大幅に大きくすることが可能であることが分かった。また消費電力量についても生産量が多い多筒型の方が単筒型よりも有利であることが明らかとなった。

今回の実験においては粉碎条件を一定としたが、実際には目的とする粉碎性状に合わせた粉碎条件、スケールアップ条件の最適化が必要不可欠であり、粉碎装置および粉碎条件の最適化によりさらに効率的に木質バイオマスの粉碎が可能になるものと考えられる。

文 献：References

- 1) 小林信介, 牛越淳太郎, 稲野稔, 高岡一栄, 板谷義紀, 日本エネ誌, **89**, 975(2010) : Kobayashi, N., Ushikoshi, J., Inano, M., Takaoka, K., Itaya, Y., *J. Jpn. Inst. Energy*, **89**, 975 (2010)
- 2) Kobayashi, N., Piao, G., Kobayashi, J., Hatano, S., Itaya Y., Mori, S., *Powder Technology*, **180**, 272(2008)
- 3) Kobayashi, N., Hirakawa, A., Okada, N., Kobayashi, J., Hatano, S., Itaya, Y., Mori, S., *Ind. Eng. Chem. Res.*, **48**, 373(2009)
- 4) 小林信介, 上田泰之, 大鹿由梨, 水野憲治, 塚田茂男, 清川英明, 小林潤, 羽多野重信, 板谷義紀, 森滋勝, 化学工学論文集, **34**, 156(2008) : Kobayashi, N., Ueda, Y., Ohshika, Y., Mizuno, K., o Tsukada, S., Kiyokawa, K., Kobayashi, J., Hatano, S., Itaya Y., Mori, S., *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **34**, 156 (2008)
- 5) 高橋武彦, 伊藤新, 遠田幸生, 伊藤一志, 小林淳一, 日本機化学会論文集(B編), **770**, 1654(2010) : Takahashi, T., Ito A., Enda, Y., Ito, K., Kobayashi, J., *Nihon Kikaigakai Ronbunshu* (B), **770**, 1654(2010)
- 6) 福村卓也, 長田光正, 戸谷一英, 二階堂満, 日エネ誌, **89**, 968(2010) : Fukumura, T., Osasa, M., Totani, K., Nikaido, M., *J. Jpn. Inst. Energy*, **89**, 968(2010)
- 7) 小林信介, 稲野稔, 坂倉慶春, 田邊靖博, 板谷義紀, 化学工学論文集(掲載決定) : Kobayashi, N., Inano, M., Sakakura, Y., Tanabe, Y., Itaya, Y., *Kagaku Kogaku Ronbunshu* (In Press)
- 8) Segal, L., Creely J. J., Martin A. E. Jr., Conrad C. M., *Textile Res. J.*, **29**, 786(1959)