研究報告

木質粉碎機の操作条件と処理能力について*

Relationships Between the Efficiency of Crushing and the Handling Condition
of Several Wood Crushers

遠藤 展**
Hiromu ENDOH

高橋 裕**
Hiroshi TAKAHASHI

山口 賢治***
Kenji YAMAGUCHI

遠藤 一夫****
Kazuo ENDOH

1. 緒 言

石油にかわる再生産可能な資源として木材が再めて見直されており、多糖類または、アルコールを生産するため、微粉碎した木材の酵素分解性に関する研究¹⁾や、木粉の流動層熱分解に関する研究など²⁾が最近行なわれている。

木材の粉碎プロセスは、これらの実用化に欠くことができない。木材の湿式法による微粉碎に関しては、製紙工業において経験的な知見が蓄積されているが、乾式粉碎において一般則を見出そうとする試みは未だ行なわれていない。

筆者らは、木質および樹皮を、目皿を用いていない粉碎機で粉碎する場合に要する動力について前報³⁾において報告した。その報告において、粉碎動力と粉碎物の粒度との関係は、摩砕型、および衝撃型粉碎機についてはKickの表示式が、また切削型についてはRittingerの表示式と類似な関係が得られることを示し、粉碎動力を推定する方法を提示した。

前報告³⁾では、一定の粉碎比の粉碎物を得るための設備動力の推定が可能となったが、粉碎機の操作条件と時間当りの処理能力との関係については明らかにしていない。本報告では、衝撃型粉碎機3種につき、スケールアップを含み、その操作条件と処理能力との関係について検討を行なったので報告する。

2. 実験装置と方法

2.1 原料木材

実験に用いた原料の種類は、木質4種、樹皮1種である。木材の性質は、その密度によって大きく変化することが知られている。そこで、密度の異なるシナノキ、ミズナラの2種類の広葉樹と、針葉樹として北海道の代表的人口造林種であるカラマツ、トドマツ、およびトドマツ樹皮を用いた。これらの木質および樹皮を、紙の原料である木材チップを作るパルプチップパーで粗砕したのち、20 mm、10 mmのふるいを用い、3種の大きさに分けて用いた。

Table 1に実験試料の形状、密度を示した。木材中の水の重量を、木材の乾燥重量で除した値をパーセントで表示した含水率は、前報³⁾と同様に35%に調整した。

2.2 実験装置と操作条件

実験装置は、前報告³⁾に用いたFig. 1のユニバーサルクラッシャーと呼ばれる実用規模のハンマーミルと、Fig. 2に示したノボロータールミルといわれる比較的小型な目皿つきハンマーミル、およびFig. 3に示した微粉

Fig. 1 ユニバーサルクラッシャー

昭和58年6月6日受付

*第33回日本木材学会大会にて発表(1983.4 京都)

**北海道立林産試験場(〒070 旭川市緑町12丁目)

TEL 0166-51-1171

***理化学研究所(〒351 和光市広沢2-1)

TEL 0484-62-1111

****北海道大学工学部(〒060 札幌市北区北12条西8丁目)

TEL 011-711-2111

Table 1 原料の形状と比重

Wood species	Screen opening	Length mm	Width mm	Thickness mm	D_v mm	Density g/cc
Sinanoki (<i>Tilia japonica</i> Simk)	20 mm on	42	16	3.7	17	0.305
	20~10 mm	22	14	3.7	13	
	10 mm Pass	6.7	12	2.3	7.2	
Todomatu (<i>A. Mayriana</i> Miyabe et Kudo)	20 mm on	25	22	3.2	15	0.326
	20~10 mm	11	15	2.9	9.8	
	10 mm Pass	6.0	13	1.9	6.5	
Bark of Todomatu (Bark of <i>A. Mayriana</i> Miyabe et Kudo)	20 mm on	27	29	5.5	20	0.390
	20~10 mm	22	16	3.8	14	
	10 mm Pass	14	8.0	2.2	7.7	
Mizunara (<i>Q. crispula</i> Blume)	20 mm on	35	17	3.9	16	0.646
	20~10 mm	19	13	3.4	12	
	10 mm Pass	7.5	12	2.3	7.4	
Karamatu (<i>Larix Kaempferi</i> Sarg)	20 mm on	29	18	4.4	16	0.390
	20~10 mm	15	15	3.1	11	
	10 mm Pass	6.6	12	2.2	7.0

Fig. 2 ノボローターミル

Fig. 3 ウルトラプレックス

Table 2 供試粉砕機の仕様

Novorotor mill	Power	5.5 kW × 2
	Revolutions per minute	1435 rpm
	Diameter and length of crushing room	300φ × 120 mm × 2
	Number of hummers	56
Universal crusher	Power	22 kW
	Revolutions per minutes	0~1700 rpm
	Diameter and length of crushing room	680φ × 810 mm
	Number of hummers	52
Ultraplex mill	Power	18.5 kW
	Revolutions per minutes	7100 rpm
	Diameter and length of crushing room	304φ × 110 mm
	Number of hummers	26

碎用のウルトラプレックスと呼ばれる目皿つきハンマーミルを用いた。これら3種の粉砕機の仕様を Table 2 に示した。

粉砕機の操作条件は、次の如くである。ノボローターミルについては回転数を一定とし、用いる目皿の形状をハンマー回転方向に長い長方形で、それぞれ長さ、幅の順で、40×15 mm, 30×10 mm, と 5 mm, 10 mm の円形のものを用いた。実用規模のハンマーミルであるユニ

Fig. 4 ユニバーサルクラッシャーの目皿の状態

Fig. 5 ユニバーサルクラッシャーの内部

バーサルクラッシャーについては、回転数を500, 1200, 1700 rpm の3条件を設定した。目皿を用いる場合は、Fig. 4に示したように、粉碎機下部に目皿を設置した。Fig. 5には、ユニバーサルクラッシャーの目皿なしの状態Aと目皿つきの状態Bとを模式的に示した。目皿は、50, 20, 10 mmの円形目皿および、ノボローターミルと同じ形状で、30×10 mm, 20×10 mm, および目開き10 mm, 5 mm, 2.5 mm, 1 mmの金網を用いた。また、ウルトラプレックスについては、回転数を3500, 5000, 7100 rpmの3条件とし、用いる目皿は円形で0.2, 0.4, 0.6 mmの3種類とした。

2.3 実験方法

以下の方法で実験を行なった。予備実験において、約10分間原料を連続的に一定速度で粉碎機に投入した。この実験により、投入速度と排出速度が等しい定常状態となる条件を選定した。同条件下で、約10分間粉碎機へ原料を供給し、粉碎動力、および粉碎機よりの排出速度を連続的に測定した。10分後、粉碎機を止め粉碎機内に残った末粉碎物の重量をホールドアップ H_u とし、この値を排出速度で除した値を滞留時間 τ_0 と仮定した。粉碎物は、ふるい分けによりその粒度分布を求め、前報³⁾に示した如く、その50%代表径の持つ体積を基準とした球相等径を粉碎物の代表粒径 d_v とした。

Fig. 6 ホールドアップと滞留時間の関係

Reduction ratio parameter	Screen	Symbol
0.3	Not equipped	●
1.5	Equipped	○
2.1	Equipped	△
2.6	Equipped	□

3. 実験結果と考察

3.1 操作条件と処理能力

Fig. 6に、滞留時間 τ_0 と、ホールドアップ H_u との関係を示した。 τ_0 は H_u にほぼ比例することが認められる。

筆者らは、前報³⁾において、目皿を用いない衝撃型粉碎機について、粉碎動力が以下の実験式であらわしうること示している。

$$-\frac{\Delta E}{D_v - d_v} = c' \frac{1}{d_v} \quad \dots\dots(1)$$

上式を変形すると

$$-\Delta E = c' \left(\frac{D_v}{d_v} - 1 \right) = c' R_d \quad \dots\dots(2)$$

となる。 R_d は粉碎比をあらわすパラメーターである。同図は、この R_d を変数としている。

Fig. 7には、ホールドアップを1 kgとした場合の、滞留時間 τ_0 と R_d との関係を示した。樹種は、トドマツの木質であり、ハンマーの遠心加速度 $R\omega^2$ をパラメーターとしている。この図より、 τ_0 は R_d にほぼ比例していることがわかる。

Fig. 8には、ホールドアップ、および R_d を一定としたときの滞留時間とハンマーの遠心加速度との関係を示した。同図より、滞留時間は遠心加速度のほぼ $-2/3$ 乗に比例している。

以上の結果より、滞留時間 τ_0 、ホールドアップ H_u 、および粉碎機パラメーターとの間には以下の関係が成立

Symbol	Centrifugal acceleration of the hammer $R\omega^2$	Screen
○	9.3×10^2	Equipped
△	5.4×10^3	Equipped
□	1.1×10^4	Equipped
▲	5.4×10^3	Not equipped

Fig. 7 粉砕比パラメーターと滞留時間の関係

Fig. 8 ハンマー遠心加速度と滞留時間の関係

する。

$$\tau_0 = r_1' \cdot H_u \cdot \left(\frac{D_v}{d_v} - 1 \right) (R\omega^2)^{-2/3} \quad \dots\dots(3)$$

上式を変形すると

$$H_u / \tau_0 = r_1 \cdot \left(\frac{D_v}{d_v} - 1 \right)^{-1} (R\omega^2)^{2/3} \quad \dots\dots(4)$$

となる。この実験式の係数 r_1 は、木質で 7.8×10^{-5} 、樹皮で 7.0×10^{-4} である。この式の左辺は、ホールドアップをその滞留時間で除した値であり、この値は、粉砕機の単位時間の処理能力を示している。したがって、粉

Fig. 9 目皿径と粉砕物の大きさの関係

砕機の処理能力は、遠心加速度、粉砕比によって代表される操作条件に最も影響を受け、上式によって処理能力の評価がほぼ可能になると考えられる。また、同一の操作条件下では、木質の種類による粉砕能率の差は認められないが、木質と樹皮では、樹皮を粉砕の方が粉砕機の処理能力がたかまることが示された。その理由として、樹皮の機械的強度が木質に比較して小さいことが考えられる。

3.2 目皿径と粉砕物の粒度について

(4)式を用いて、粉砕機の実作条件とその処理能力を推定するには、以下の方法による。粉砕物の粒度を制御できない目皿なし粉砕機については、希望する粉砕物の粒度と、ハンマーの遠心加速度によって供給可能速度の推定が可能となる。また、目皿つき粉砕機については、粉砕比は、用いる目皿の大きさによるので、用いた目皿径と、ハンマー遠心加速度により処理能力が推定できることになる。そこで、希望する粉砕物を得るための目皿の大きさを選定する方法が問題となる。この点について、次に検討を加えた。

Fig. 9 には、用いた目皿の面積基準の円相等径 S_d と、この目皿を用いて粉砕した時の粉砕物の代表粒径 d_v との関係の木質について示した。この図より、粉砕物の粒度は、目皿の面積基準の円相等径 S_d の約 1/2 乗に比例していることが示された。また、トドマツ樹皮についても同様な相関係が得られた。この図では、ハンマーの遠心加速度 $R\omega^2$ をパラメーターとしているが、粉砕物の粒度 d_v と、遠心加速度 $R\omega^2$ との間には関係が見られるようであり、この関係を Fig. 10 に示した。

同図より、木質と樹皮を比較すると、遠心加速度の小さい範囲では、同一の大きさの目皿を用いた場合、樹皮は木質より小さくなるが、遠心加速度が大きくなるにつ

Fig. 10 ハンマー遠心加速度と粉碎物の大きさの関係

Fig. 11 粉碎比パラメーターと粉碎正味動力の関係

れ、木質と同等か、または粗くなる傾向が認められた。

Fig. 10 から、粉碎物の大きさ d_v と、目皿径 S_d 、遠

心加速度 $R\omega^2$ との間には次式の関係が成り立つことが認められた。

$$d_v = r_2 (S_d)^{1/2} (R\omega^2)^n \quad \dots\dots(5)$$

r_2 , n は上記実験式の係数であり、木質の場合 r_2 , n の順で、2.64, $-1/2$, トドマツ樹皮の場合、0.457, $-1/3$ であった。

3.3 粉碎動力について

木質、およびトドマツ樹皮を目皿を用いない粉碎機にて粉碎する場合の粉碎動力については前報³⁾において報告した。目皿つき粉碎機についても、同様な相関が得られるかを次に検討した。

目皿つき粉碎機への原料の供給速度を変え、定常状態を見出し、この状態での動力と粉碎比パラメーターとの関係を Fig. 11 に示した。図中実線は、前報³⁾において、目皿なし衝撃型粉碎機について報告した相関である。この結果から、目皿つき粉碎機の粉碎動力についても、目皿なし粉碎機とほぼ同様な相関があると考えられる。

4. 結 論

回転数、目皿の大きさ、および装置の大きさの異なる3種類の目皿つき粉碎機を対象として、粉碎機内のホールドアップ、滞留時間、粉碎動力の測定を行なった。その結果、これらの粉碎機の処理能力は、粉碎機を与える遠心加速度、および用いる目皿の大きさなどの操作条件によって支配されることが分った。さらに、目皿を用いない粉碎機についても、その操作条件である回転数とその処理能力との間には、目皿を用いた場合と同様な相関があること、および粉碎動力についても同様の相関があることを見出した。

使 用 記 号

E : 粉碎正味動力	[kWh/ton]	H_u : 粉碎機内のホールドアップ	[kg]
c', r_1', r_2, n : 実験定数		τ_0 : 粉碎機内の滞留時間	[s]
R_d : 粉碎比パラメーター	[—]	R : 粉碎機の内径	[m]
D_v : 原料の球相等径	[m]	ω : ハンマーの回転角速度	[rad/s]
d_v : 粉碎物の球相等径	[m]	S_d : 目皿の円相等径	[m]

引 用 文 献

- 1) 村木永之介, 夜久富美子, 田中龍太郎, 越島哲夫: 木材学会誌, 28, 2, 122 (1982)
- 2) 三浦正勝, 西崎寛樹, 田中龍太郎, 夜久富美子: 木材学会誌, 28, 10, 649 (1982)
- 3) 遠藤展, 高橋裕, 山口賢治, 遠藤一夫: 粉体工学会誌, 20, 2, 68 (1983)

Authors' Abstract

Relationships Between the Efficiency of Crushing and the Handling Condition of Several Wood Crushers.

by

Hiromu ENDOH*, Hiroshi TAKAHASHI*, Kenji YAMAGUCHI**
and Kazuo ENDOH***

(*Hokkaido Forest Products Research Institute
**The Institute of Physical and Chemical Research
***Faculty of Engineering, Hokkaido University)

This paper is concerned with the efficiency of four types of hammer crushers and the size of the crushed wood particles. The relationships between the power requirement of the crusher of screenless and screened hammer mills were also examined.

Three types of screened hammer mills and one type of screenless hammer mill, were examined.

The main variables of the crushers were the scale of the mill, the screen opening, and the rotational speed.

The relationships between the efficiency and the handling condition of the crushers were as follows:

$$\frac{H_u}{\tau_0} = r_1 \left(\frac{D_v}{d_v} - 1 \right)^{-1} (R\omega^2)^{2/3}$$

where r_1 was experimental coefficient. It was 7.8×10^{-5} for wood, and 7.0×10^{-4} for the bark of spruce.

The size of the crushed particle, d_v , was expressed as follows:

$$d_v = r_2 (S_d)^{1/2} (R\omega^2)^n$$

where r_2 and n were experimental coefficients. They were 2.6, $-1/2$ for wood, and 0.46, $-1/3$ for the bark of spruce.

The power requirement for crushing wood was found to follow Kick's law for the four types of hammer mills examined.

List of Figures and Tables

Fig. 1 Universal crusher: commercial scale hammer mill	leration of the hammer and holding time in the crusher
Fig. 2 Novortor mill: bench scale hammer mill	Fig. 9 Relationship between the diameter of the screen and the diameter of the wood particle crushed
Fig. 3 Ultraplex mill: hammer type of fine grinder	Fig. 10 Relationship between centrifugal acceleration of the hammer and diameter of the wood particle crushed
Fig. 4 Universal crusher screen	Fig. 11 Relationship between the reduction ratio parameter and the net power requirement for crush
Fig. 5 Screenless, A, and screen, B, condition of Universal crusher	Table 1 Shape and density of wood chips examined
Fig. 6 Relationship between hold up and holding time in the crusher	Table 2 Performances of the examined crushers.
Fig. 7 Relationship between the reduction ratio parameter and the holding time in the crusher	
Fig. 8 Relationship between centrifugal acceleration of the hammer and holding time in the crusher	