

木 粉 を つ く る

一目皿付き衝撃型粉碎機の処理能力と
正しいモータ馬力の選定について

遠 藤 展

粉碎技術はなぜ必要なのか

北海道の木材素材の消費量は、平成2年度の北海道林務部の調査では、図1に示したように、輸入材も含め年間9,839千 m^3 です。このうち木製品に使われたものは、製材品2,602千 m^3 、単合板433千 m^3 、フローリング46千 m^3 （製品の厚さを20.5mmとした）、合計で3,081千 m^3 と素材消費量の約3割に過ぎません。残りの7割（6,789千 m^3 ）は、そのままでは利用できないため、いったん、粉碎処理を加えてその形状を整え、主にパルプチップや家畜敷料などの小さな粒状物として利用しています。木材に付加価値を付けるためには、パルプチップにしかならないような原木から、いかに利用できる材を取り出すかは大きな課題であり、各種の検討が行われています。

しかし、現実には、木材利用の大半は製材、単合板、フローリングなどの比較的大きい素材として利用されているのではなく、パルプチップや家畜敷料に代表される小さな粒状物としての利用です。木材利用の7割を占めるこの粒状物としての利用のためには、粉碎処理は欠くことのできない工程

です。

粉碎機にはその機構によって切削型、衝撃型、摩砕型があります。切削型粉碎機とは、刃物による切削力で木材を細かくするもの、衝撃型粉碎機は、主に回転するハンマーが木材に与える衝撃力で木材を細かくするもの、摩砕型粉碎機は、木材にせん断力を加え木材を細かくするものです。

粉碎処理技術のうち、パルプチップの生産には、チップパーが用いられていますが、これは切削型粉碎機に属します。また、このパルプチップを蒸解してパルプを作りますが、このとき用いるのが摩砕型粉碎機です。このパルプ工業で用いられている切削型と摩砕型の粉碎機については、歴史も古く、従来いろいろな実験が行われ、数多くの知見があります。しかし、チップにもならない木材は、有効な利用法がなく、木質系廃材として長い間廃棄されてきたため、パルプチップ以外の粉碎技術の検討は十分には行われてきませんでした。

しかし、最近では、廃材の有効利用のための努力の結果、その状況は一変し、燃料、家畜敷料、キノコ培地、堆肥などの需要が増大してきました。いわゆる林産工業で廃材といわれるものは、廃棄されるものはごく少量で、そのほとんどがなんらかの形で利用されるようになりました。このように、木質系粒状物の需要が開拓されるにつれて、木質系廃材の効率的粉碎技術が求められるようになってきたわけです。

木質粉碎機開発の歴史

このように、木質系粉碎物に対する需要の増加

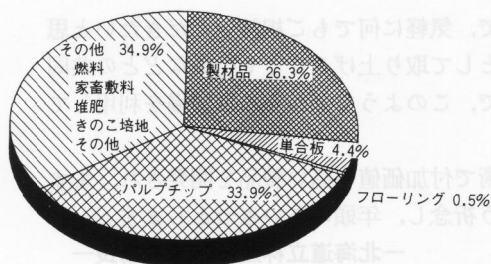


図1 北海道における木材利用状態

とともに、各種の粉碎機が開発され市販されてきました。初期の木質系廃材の粉碎物の用途は、主に樹皮を原料とした家畜敷料でした。この製造には、切削型粉碎機が用いられました。しかし、この方法では切削用刃物がすぐに摩耗し、交換に要する時間と費用がかかりすぎるため、後に衝撃型粉碎機による粉碎へと変化しました。

家畜敷料については、粉碎樹皮と共にノコクズが用いられてきましたが、キノコ栽培が盛んになるにつれノコクズの需要が増大し、切削型のノコクズ製造機が販売され、さらに切削型と衝撃型を組み合わせた新しいノコクズ製造機も出現しました。また現在では、パルプチップ市況の悪化から、チップからノコクズを製造できる衝撃型粉碎機の開発の方向へ向かいつつあります。

このように、木質系粒状物の需要の増大に伴い各種の切削型、衝撃型、摩砕型粉碎機が開発されてきましたが、その設計は経験に基づくものが多く、特に衝撃型粉碎機については、必ずしも明確な設計指針を有して製作されてきたものとは言い難いのが現状です。

本研究の目的

粉碎機に限らず、機械の重要な性能の一つは、一定時間当たりの処理能力です。製品の生産コストを下げるためには、処理能力の大きい機械が必要です。

ここでは、各種の粉碎機の中でも価格が安く、構造も簡単で、保守管理が容易なため広く普及している目皿付き衝撃型粉碎機を取り上げ、その仕様、操作条件、原料の粉碎性と処理能力との関係について検討しました。このことによって、使用している粉碎機については、その運転方法を変えた場合の処理能力が推定できます。また、新たに粉碎機を設計する場合においては、目標とする処理能力を達成するための設計指針が得られることになります。

木質粉碎物の大きさをどのように決めるか？

「粉碎」という課題を取り上げる場合、まず問

題となるのは、粉の大きさをどのように決めるかということです。

無機物を粉碎する場合、ほとんどの粉碎物の形状は、幅も厚さも長さもほぼ等しく、球に近い形状となります。したがって、ふるい分けによってその大きさをすぐ知ることができます。

しかし、木材（樹皮も含めて）の粉碎物では、このようにはいきません。木材を粉碎機によって粉碎した場合、その繊維方向の強度が大きいため、図2に示したように、粉碎物の形状は繊維方向が長い、球形に近似できない形状となります。一般にこのような形状の粉を、無機系の粉と比較するためには、その粒子と同じ体積を持つ球の直径、すなわち球相等径を用いて行う場合が多いです。

そこで、代表的な切削型（パルプチッパー）、衝撃型（ハンマーミル）、摩砕型粉碎機（ダブルディスクリファイナー）3種を取り上げ、粉碎物のふるい分けを行い、各ふるいにおけるその粉碎物の長さ、厚さ、幅を測定しました。最も形の複雑なもの、ダブルディスクリファイナーの粉碎物で、幅と考えられるものが二つあります。

それは、繊維束から張り出した“ひげ”も含めた幅 W_1 と、平均値と考えられる幅 W_2 です。ハンマーミルにも同様なものはみられますが、パルプチップでは、 $W_1 = W_2$ です。粉碎物の体積は $W_2 \times \ell \times \text{厚さ}$ ですが、各ふるい目開き径の中央値との相関の一番高い物は、 W_1 です。（すなわ

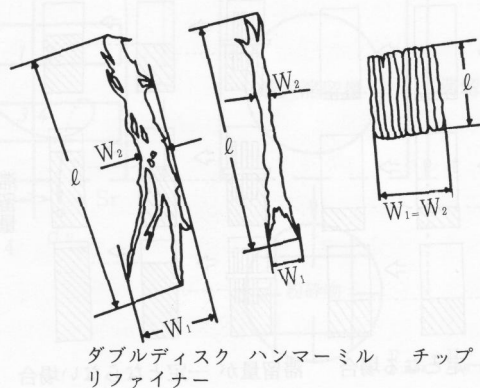


図2 粉碎物の形状

ち、木質系の粉はふるいの目を縦方向にすりぬけて通過していることが分かります。)

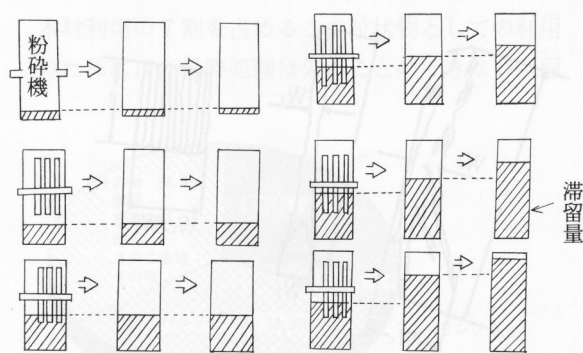
この W_1 と W_2 、 l 、厚さには、粉碎機ごとに一定の相関を有していることが分かりました。したがって、ふるい分けにより粉碎物の W_1 が分かれば、その粉碎物の平均の長さ、厚さ、幅を求めることができます。

本研究では、この粉碎物の平均の長さ、厚さ、幅からその体積を求め、この体積と同じ体積を持つ球の直径を、その粉碎物の平均の大きさを表す代表粒径 $d_v(\text{mm})$ と定義しました。

処理能力とは

粉碎をする場合、目的とする大きさの粉を、いかに速く生産するかが一番の課題です。粉の大きさは、今回とりあげた目皿付き衝撃型粉碎機においては、主に目皿の大きさに支配されていますので、まずその処理能力について考えてみました。いろいろな文献を調べてみましたが、粉碎機においては、その処理能力の定義は必ずしも明らかではなく、“粉碎機が停止してしまう供給速度です”という程度の認識しかないようです。そこで、まずこの処理能力の定義を行いました。

粉碎機に原料を投入しますと、原料は瞬間的に粉碎されて出てくるのではなく、一定の時間(滞留時間という)かかって粉碎されて出てきます。粉碎機の中には、この時間待ちの原料が幾らか残っています。これを滞留量といいます。この測定は



滞留量が一定となる場合 滞留量が一定とならない場合

図3 粉碎機内の滞留量の変化

いたって簡単で、粉碎機に入れた量と、出た量との差を測定すればいいのです。この滞留量がどのようになっているかを図3の“滞留量が一定となる場合”に示しました。

滞留量は、粉碎機への原料の供給速度が小さい場合、その量も小さく時間的にも一定となります。次に供給速度をすこしずつ上げますと、時間的には一定となりますが、滞留量はすこしずつ大きくなります。図4には、この“滞留量と供給速度との関係”を示しました。少し難しくなりますが、この直線の傾きが滞留時間です。すなわち先ほど述べた滞留時間は、この図から求めます。

さらに、供給速度を上げていきますと、今度は図3の“滞留量が一定とならない場合”のように、滞留量は一定の値を示さなくなります。これは、“この粉碎機はこれ以上粉碎できませんよ”ということを示しています。つまり、入ってくる量を粉碎機は処理しきれず、段々、粉碎機の中に、原料が消化不良のように溜り始めているということです。

この溜り方の速さは、もちろん、供給速度によって変わってきます。供給速度が小さい場合は遅いですし、大きい場合は速くなります。そして、このまま放置しますと粉碎機は、抱えきれない荷物

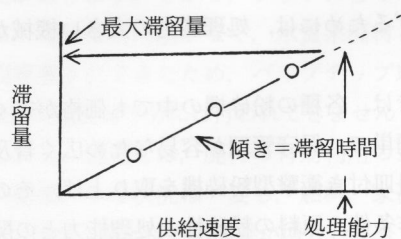


図4 粉碎機内の滞留量と供給速度との関係

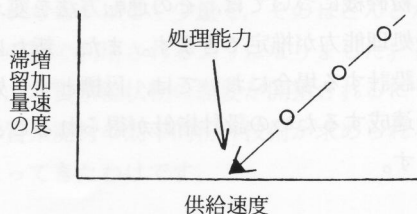


図5 粉碎機内の滞留量の増加速度と供給速度との関係

を背負って止まってしまいます。この関係を図5に示しました。縦軸は、溜り方の速さ（滞留量の増加速度）、横軸は供給速度です。

今、図の○印を直線で結び、この直線と横軸の交わった所の供給速度を考えてみます。結論からいいますと、この供給速度がこの粉碎機の処理能力です。この速度を超える速度で粉碎機に原料を供給しますと、粉碎機の中に原料が溜り続け、最終的には粉碎機を止めてしまうからです。（実際には、供給速度オーバーが少ない場合は、停止までにはかなり時間はかかりますが）

処理能力は二つの要素から成り立つ

さて、このように処理能力を定義し、そして、この方法で算出しました。

次に、この値と、粉碎機の大きさや運転方法とは、どのような関係を持っているかということです。そこで、まず問題点を整理し、処理能力を二つの要素に分けて考えてみました。

処理能力の大きい粉碎機というものを考えてみてください。処理能力の大きい粉碎機とは、まず粉碎機が大きくて（正確には少し違いますが）大量の原料を収容でき、かつ、例えば粉碎機ハンマーの回転数が大きくて、大量の原料を短い時間で粉碎できるものです。したがって、粉碎機の処理能力はこの原料の収容能力（最大滞留量ともいうべき量）と、この量を処理するのに必要な時間（前に述べた滞留時間）の二つの要素から成立しています。この関係は簡単な次の式で表されます。

$$\text{粉碎機の処理能力} = \frac{\text{最大滞留量}}{\text{滞留時間}} \quad (1)$$

このように、処理能力を二つの要素に分け、それぞれの要素について考えてみます。その前に、この二つの要素の測定方法です。

前に示した図4の“滞留量と供給速度との関係”をみてください。滞留時間はこの直線の傾きから求めます。

さて最大滞留量です。結論からいいます

と、この図の横軸の供給速度にこの粉碎機の処理能力の値をとります。図の矢印にそって、この処理能力のときの、縦軸の滞留量が、最大滞留量です。処理能力のところで考えたように、この速度を超える速度で粉碎機に原料を供給しますと、粉碎機の中に原料が溜り続け、最終的には粉碎機を止めてしまうからです。この滞留量が最大許容できる滞留量、すなわち、最大滞留量なのです。

最大滞留量は何で決まるか？

さて、このようにして測定した二つの量は、粉碎機の何と関係しているのでしょうか？

図6には、目皿付き衝撃型粉碎機のモデルをあげ、この二つの量に関係していると考えられる要素を示しました。N はハンマーの数（この場合は4個）、r はハンマーの先端から粉碎機の回転軸までの距離（m）、 ℓ はハンマーの回転軸方向の幅（m）、 S_r （%）は目皿の開孔比、 ω はハンマーの回転角速度（rad/s）、 P_{\max} （kW）はモータの馬力です。

まず、最大滞留量ですが、以下の実験式で示されます。

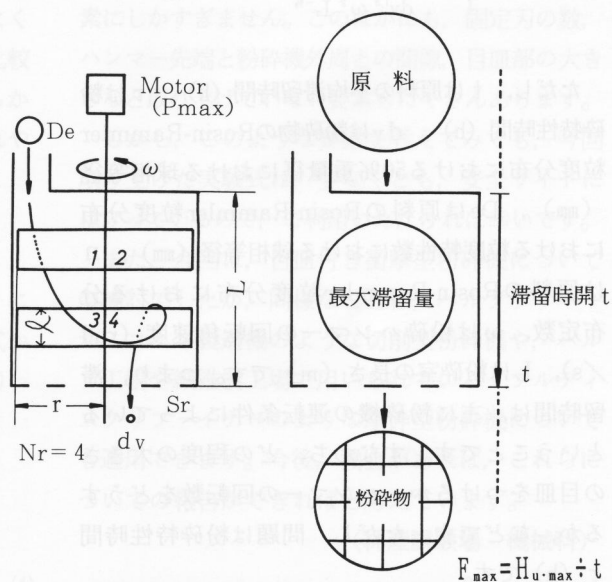


図6 目皿付き衝撃型粉碎機のモデル

$$Hu \cdot \max = 3.95 \times 10^{-2} \rho_b N_r r \ell Sr^{1/2} \quad (2)$$

上式において $Hu \cdot \max$ (kg) は定常状態で運転可能な最大滞留量 (乾物), N_r はハンマーの数, r はハンマーの先端から粉碎機の回転軸までの距離 (m), ℓ はハンマーの回転方向の幅 (m), ρ_b (kg/m³) は原料に外力を加えないで充てんした場合の乾物かさ密度, Sr (%) は目皿の開孔比です。

この式の内容は以下のように考えられます。 $N_r r \ell$ は、ハンマーが回転することによって作り出される体積のようなものを表していると考えられ、これに ρ_b を掛けていますから、ハンマーが回転することによって作り出される体積の中に収容できる原料の量を示しています。すなわち、最大の滞留量は主に粉碎機の形状に支配されています。

滞留時間は何によって決まるか？

次に滞留時間です。これも以下の実験式で表されます。

$$t = \frac{3.98 \times 10^3 \tau (0.693 - (\frac{dv}{De})^n)}{dv^{1.3} \omega^2 L^{-1}} \quad (3)$$

ただし、 t は原料の平均滞留時間 (h), τ は粉碎特性時間 (h), dv は粉碎物の Rosin-Rammler 粒度分布における 50% 重量径における球相等径 (mm), De は原料の Rosin-Rammler 粒度分布における粒度特性数における球相等径 (mm), n は原料の Rosin-Rammler 粒度分布における分布定数, ω は粉碎ハンマーの回転角速度 (rad/s), L は粉碎室の長さ (m) です。つまり、滞留時間は、主に粉碎機の運転条件によっているということです。すなわち、どの程度の大きさの目皿をつけるか、ハンマーの回転数をどうするか、などです。ただし、問題は粉碎特性時間 τ (h) です。

今、この滞留時間について考えてみます。同じ

運転方法でも木材と樹皮、湿った木材と乾いた木材とでは滞留時間が違ってきます。木材の場合は樹皮より粉碎されにくいので時間がかかるし、樹皮の場合は木材より粉碎されやすいので滞留時間が短いはずです。この評価は、滞留時間には欠かさないものです。式 (3) で、この評価をしているのが、この粉碎特性時間です。

この粉碎特性時間の測定方法を、図 7 にあげ、以下に述べます。

まず、内容積が約 8 リットル程度の磁製ボールミルに、その全ボールの体積の 30% に当たる 1 ~ 2 mm にふるい分けした一定量の原料を入れます。次に一定時間粉碎し、粉碎物を取り出し、今度は 1 mm のふるいで、ふるい上とふるい下に分けます。このふるい下の重量を、その粉碎時間で割って粉碎速度を求めます。この値をこの図のグラフの粉碎回数 1 回目の所に書き入れます。

次に、ふるい上には、最初入れた重量と同じになるように、新しい原料を加え、またボールミルで粉碎します。次の粉碎時間はよく知られている粉碎速度式を用いて推定しながら、この作業をくりかえします。

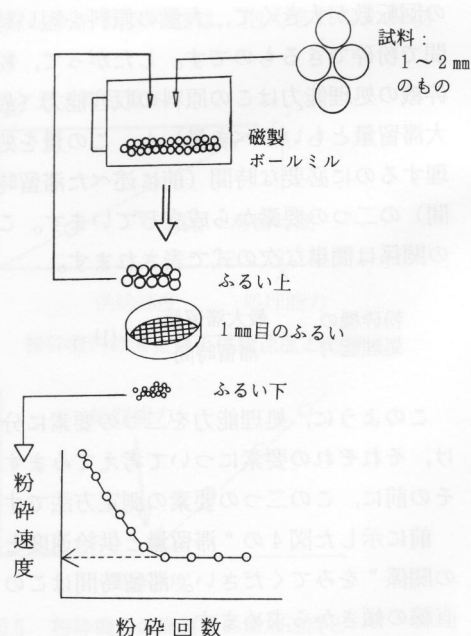


図 7 粉碎特性時間の測り方

表1 ボールミルによる粉碎特性時間

材料	水分 (%)*	粉碎特性時間 (h)
シナノキ	30	9.51
ミズナラ	30	11.6
シラカンバ	30	4.0
カラマツ	30	8.7
カラマツ	6.7	5.8
トドマツ	30	17.2
トドマツ樹皮	30	0.69
トドマツ樹皮	11.3	0.29
エゾマツ樹皮	30	0.71
木炭	1.8	0.096
石炭	4.2	0.15
砂	0	0.34
ゴム	0	325

*湿量基準の水分

その結果を図7のグラフに示しました。縦軸には粉碎速度を、横軸には粉碎回数を示しています。約10回程度で一定速度になります。

この速度を使い、ボールミルに入れた原料が、すべて1mmのふるいを通過する大きさまで粉碎される時間を求めます。この値が粉碎特性時間 τ (h)です。

表1に、測定結果を示しました。粉碎特性時間の長いものは、粉碎しづらい原料です。この表によりますと、経験的にいわれている、木材と樹皮、湿った木材と乾いた木材の粉碎性の差がよく分かります。また、砂や石炭などの無機物と比較して、木材がいかに粉碎されにくいものであるかも分かります。このようにして、粉碎の「されやすさ、されにくさ」の評価をしました。

モータの馬力は？

さて、いよいよ最後になりました。式(1)に示しましたように、最大滞留量と滞留時間の式から、粉碎機の処理能力(乾物) F_{\max} (kg/h)は、次式のようにになりました。

$$F_{\max} = \frac{Hu \cdot \max}{t} = \frac{9.92 \times 10^{-6} \rho_b N_r r \ell S r^{1/2} dv^{1.3} \omega^2 L^{-3/2}}{\tau [0.693 - (\frac{dv}{De})^n]} \quad (4)$$

さて、ここでまた考えてみてください。粉碎機がどれほど大きな処理能力を持っていたとしても、それに付いているモータが小さければ、この粉碎機は、その能力を十分に発揮することはできません。すなわち、モータはその処理能力に一致したものでなければならぬわけです。この処理能力に一致したモータの馬力 P_{\max} (kW) (適正原動機馬力とする)は、現物(水を含んだ重量)最大滞留量 $Hu \cdot \max \cdot wet$ を使って、次式で示されました。

$$P_{\max} = 2.0 \times Hu \cdot \max \cdot wet \quad (5)$$

すなわち、適正原動機馬力は、(2)式に基づいて $Hu \cdot \max$ (乾物kg) を求め、これをその水分を使って現物に換算し、(5)式に従って求められます。つまり、適正原動機馬力は、その粉碎機が許容できる、最大の原料収容能力によって決定されることになります。

おわりに

この報告では、すべての実験結果を数式で示しましたが、実際の関係は、この数式のまわりに一定の“バラツキ”で分布しています。今回取り上げた要素は、図6に示したように、粉碎機のごく一部の要素にしかすぎません。このほかにも、固定刃の数、ハンマー先端と粉碎機外周との間隙、目皿部の大きさなど取り上げていない要素もたくさんあります。

しかし、このような要素を考えてみても、今回取り上げた実験式は、少なくとも、安全サイドには立っているので、ご利用いただければ幸いです。

また、今回は、目皿付き衝撃型粉碎機についての検討でしたが、同様なことは、パルプチッパーやノコクズ製造機のような切削型粉碎機や、パルプ工場や繊維板工場で用いられているダブルディスクリファイナーのような摩砕型粉碎機についても適用できます。今後、機会があれば、これらについての報告ができればと考えています。

(林産試験場 機械科)