

木質粉砕機に関する研究

遠藤 展

Studies on Wood Crushing

Hiromu ENDOH

Keywords : Wood crushing , hammermill , crushing capacity , holdup , mean residence time .
木材の粉砕 , ハンマーミル , 粉砕能力 , 滞留量 , 平均滞留時間 .

目次

第1章 緒言

1.1 粉碎技術の必要性	1
1.2 木質粉碎機開発の歴史	2
1.3 既往の研究	2
1.4 本研究の目的	4
1.5 本研究の概要	4
1.5.1 最大処理能力算定方法の確立	4
1.5.2 各種粉碎機における最大処理能力	5
1.5.3 各種粉碎機の適正原動機出力の推定	5
1.6 本論文の範囲	5

第2章 最大処理能力の算定方法の確立

2.1 最大処理能力の算定方法の確立	6
2.1.1 はじめに	6
2.1.2 供試木材	6
2.1.3 供試粉碎機	7
2.1.4 実験方法	7
2.1.5 実験結果と考察	8
2.2 木質粉碎物の形状と粒度表示	9
2.2.1 はじめに	9
2.2.2 供試木材	9
2.2.3 供試粉碎機	9
2.2.4 実験方法	10
2.2.5 実験結果と考察	11

第3章 各種粉碎機における最大処理能力

3.1 衝撃型粉碎機における最大処理能力	14
3.1.1 衝撃型粉碎機における滞留時間と粉碎機操作条件の関係	14
3.1.1.1 はじめに	14
3.1.1.2 供試粉碎機と実験条件	14
() ユニバーサルクラッシャー	15
() ノボロータミル	16
() ウルトラプレックス	16
() 滞留時間の測定	16
3.1.1.3 実験結果と考察	17
3.1.2 衝撃型粉碎機の形状と最大滞留量の関係	19
3.1.2.1 はじめに	19
3.1.2.2 供試粉碎機と木材	19

3.1.2.3	最大滞留量の測定	20
3.1.3	衝撃型粉砕機の最大処理能力の推定	22
3.1.3.1	はじめに	22
3.1.3.2	実験方法	23
3.1.3.3	実験結果と考察	26
()	最大滞留量と原料のかさ密度との関係	26
()	滞留時間と粉砕性との関係	28
3.2	摩砕型粉砕機の最大処理能力の推定	29
3.2.1	はじめに	29
3.2.2	供試粉砕機と方法	30
3.2.3	実験結果と考察	30
3.2.3.1	最大処理能力の測定	30
3.2.3.2	最大滞留量，滞留時間の測定と粉砕機構	31
3.3	切削型粉砕機の最大処理能力の推定	33
3.3.1	はじめに	33
3.3.2	実験方法と結果	33

第4章 各種粉砕機の適正電動機出力の推定

4.1	衝撃型粉砕機の適正電動機出力の推定	36
4.1.1	はじめに	36
4.1.2	実験方法	37
4.1.3	実験結果と考察	37
4.1.4	目皿径と粉砕物の粒度について	40
4.1.4.1	はじめに	40
4.1.4.2	実験方法	40
4.1.4.3	実験結果と考察	40
4.2	摩砕型粉砕機における適正原動機出力の選定	41
4.3	切削型粉砕機の適正原動機出力の推定	43

第5章 総合考察

5.1	最大処理能力算定方法の確立	45
5.1.1	最大処理能力算定方法の確立	45
5.1.2	木質粉砕物の形状と粒度表示	45
5.2	各種粉砕機における最大処理能力	45
5.2.1	衝撃型粉砕機における最大処理能力	45
5.2.1.1	衝撃型粉砕機における滞留時間と粉砕機操作条件の関係	45
5.2.1.2	衝撃型粉砕機の形状と最大滞留量の関係	45
5.2.1.3	衝撃型粉砕機の最大処理能力の推定	46
5.2.2	摩砕型粉砕機における最大処理能力の推定	47
5.2.3	切削型粉砕機の最大処理能力の推定	47
5.3	各種粉砕機の適正原動機出力の推定	48

5.3.1 衝撃型粉碎機の最大処理能力に適治した原動機の出力の推定	48
5.3.2 目皿径と粉碎物の粒度について	48
5.3.3 摩砕型粉碎機における適正原動機出力の推定	48
5.3.4 切削型粉碎機の適正原動機出力の推定	49

第6章 おわりに

6.1 供試試料としての木材の物性	50
6.2 今後の展開	50

謝 辞	51
-----	----

文 献	52
-----	----

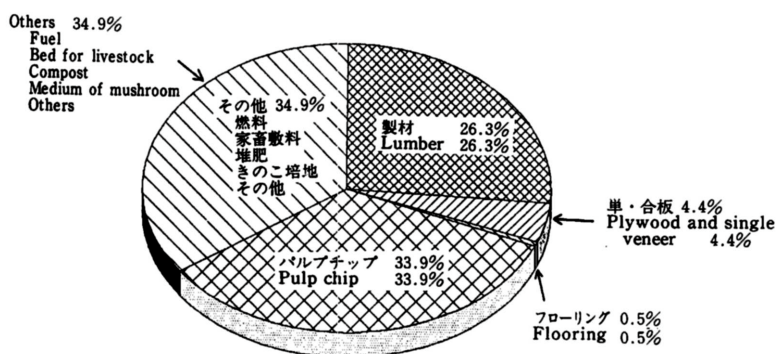
使用記号	54
------	----

Abstract	55
----------	----

第1章 緒言

1.1 粉碎技術の必要性

第1図には北海道における木材の形態別利用状態¹⁾を示した。北海道における輸入材も含めた素材の消費量は、平成2年度の調査で、年間約9,839千 m^3 である。このうち製材、単合板、フローリング等の、いわゆる木材製品になった量は製材品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20.5mとした）、合計で3,081千 m^3 であり、素材消費量の約31%にすぎない。残りの69%（6,789千 m^3 ）は、そのままでは利用できないため、いったん、粉碎処理を加えその形状を整え、主にパルプチップや家畜敷料等の粒状物として利用している。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原木から、いかに利用できる多くの材をとりだすかは大きな課題であり、各種の検討が行われている。しかし、木材の利用は製材、単合板、フローリング等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粒状物として利用が大半である。木材利用の69%を占めるこの粒状物としての利用のためには、粉碎処理が欠くことのできない工程となっている。



第1図 北海道における木材利用状態
Fig. 1. Utilizations of wood in Hokkaido.

粉碎機には粉碎機構の差異によって切削型・衝撃型・摩砕型がある。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ある。粉碎処理技術のうち、パルプチップの生産においては、チップャーが用いられているが、これは切削型粉碎機である。この切削型の粉碎機と、このパルプチップから製紙用のパルプを得る摩砕型粉碎機については、従来いろいろな実験が行われ、数多くの知見がある。しかし、パルプチップ以外の粉碎技術については、チップとして加工できない木材が、木質系廃材として長い間廃棄されてきたため、その粉碎技術の検討は十分には行われてこなかった。しかし、最近では、廃材の有効利用のための関係機関の努力の結果、その状況は一変し、燃料、家畜敷料、キノコ培地、堆肥等の需要が増大し、林産工業のなかのいわゆる廃材は、そのほとんどがなんらかの形で利用され、廃棄されるものはごく少量となった²⁻⁴⁾。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。

一方、世界的に環境の保護と資源のリサイクルに大きな関心を持たれるようになり、“地球にやさしい”とか“人間にやさしい”という標語が語られる中で、自然素材である木材の利用がふたたび注目されるようになり、いわゆる、製材、単合板、フローリング等の木材製品とともに木材を原料とした各種自然素材が開発され、そのなかでも、古くて新しい課題として木炭、特に木炭粉の需要がたかまりつつある。木炭の粉碎という新しい粉碎技術も求められている。また、木材資源のリサイクルについては、

故紙の回収とともに、木造家屋の解体廃材の利用が重要な課題となりつつある⁵⁾。木造家屋の解体廃材は従来埋め立てが主体であったが、都市近郊においては埋め立てに適した場所の確保が難しくなり、粉碎によってボード原料や、粉碎・成形によって燃料を生産する工場が建設されるようになってきている。木造家屋の解体廃材には石膏やグラスウールなどの木材以外のものが混入し、これについては粉碎の前にある程度の選別は行っているが、完全な選別は難しく、ここにおいても、木質を主体とした混合物の粉碎という新しい粉碎技術が求められている。

地球環境の保全とともに、健康に関する感心が高まりつつある。各種の健康食品が市販されるようになり、エゾウコギに代表される道産の薬効成分を含んだ製品が微粉末の形で市販されている。林産の関係では、ササの微粉末に対する需要が高まり、その微粉碎技術が求められている⁶⁻⁸⁾。

いわゆる木材製品として出荷された残りの69% (6,789千 m^3)の内約半分の34%は、パルプチップとしての利用であり、パルプチップは、代表的木質粒状物である。このパルプチップの価格決定に対しては、道内で生産される約1.7倍量(チップの比重を0.4とした)の輸入チップとの競合から、その価格決定は買い手主導型になりやすい。そこで、林業・林産サイドではパルプチップにかわる新しい用途開拓が必要となってきている。新しい需要としてパルプチップを原料とした木質飼料⁹⁻¹⁴⁾が開発されており、ここにおいても家畜の嗜好性を高めるための粉碎処理技術が必要とされている。

1.2 木質粉碎機開発の歴史

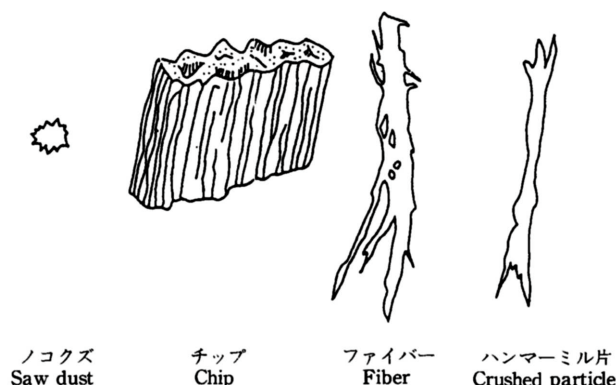
上述した、木質系粉碎物に対する需要の増加とともに各種の粉碎機が開発され市販されてきた。初期の木質系廃材の粉碎物の用途は、主に樹皮を原料とした家畜敷料であった。このために切削型粉碎機が用いられた。しかし、この方法では切削用刃物がすぐに摩耗し交換に要する時間と費用がかかりすぎるため、後に衝撃型粉碎機による粉碎へと変化した。家畜敷料については、粉碎樹皮と共にノコクズが用いられてきたが、キノコ栽培が盛んになるにつれノコクズの需要が増大し、切削型のノコクズ製造機が販売され、さらに切削型と衝撃型を組み合わせた新しいノコクズ製造機も出現した。現在ではパルプチップからノコクズを製造できる衝撃型粉碎機の開発の方向へ向かいつつある。

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いえない。

1.3 既往の研究

木質系粉碎物に要求されるものは、その粒度と形状であるが、粉碎形式の差異が最も現れるのがその形状である。第2図には、4種の代表的木質粉碎物を示した。

切削型粉碎機によって得られるのがノコクズやチップである。これら粉碎物は、基本的には、強度の大きい繊維方向も切断しなければならないので、この切削型の粉碎機が用いられる。さらに、原料はしっかり固定されていなければならない。従って、その原料は丸太や、小さいものでせいぜい背板程度のものに限定される。ノコクズの特徴は、形状が球形に近いということである。従って、絡み合いが少ないので、その流動性が大きい。これを原料とする場合、非常に制御しやすい。例えば、ホッパーなどから流れ易く、定量供給しやすいという利点がある。しかし、ノコクズを原料として成形物を作る場合はこの利点は欠点となる。すなわち、形状がほぼ球形のため絡み合いが少なく、成形品の強度が小さい。次にパルプチップについては、絡み合いは期待できないが、ノコクズのような高い流動性も期待できない¹⁵⁾。従って、チップ工場のサイロはよく詰まる。しかし、この形状は、木材への蒸解薬液の浸透が繊維方向が繊維に直角の方向より早いということから決められており、パルプ化工程に適している形状で



第2図 粉碎物の形状

Fig. 2. Shape of the particles .

ある。この切削型粉碎機については数多くの知見，例えば池田や齊藤ら¹⁶⁻¹⁸⁾の知見があり，既に教科書的な段階に達しているが，粉碎動力と粉碎物の大きさについての定量的知見は今だ得られてはいない。

ノコクズと全く逆の性質を示すのが，ファイバーである。粉碎機としては，摩砕型粉碎機のような粉碎機が適当である。原料チップは二つの回転する摩砕盤の間に供給され，せん断力で揉まれるように粉碎される。この粒子は，形状が繊維状でかつ基本繊維から派生した髭のような多くの手を有している。従って，この手同志が絡み合うため，その流動性が小さく，これを原料とする場合，非常に制御しにくい。例えば，ホッパーなどから流れにくく，定量供給しづらいという欠点がある。しかし，このファイバーを原料として成形物を作る場合，この欠点は利点となる。すなわち，形状が複雑なので絡み合いが大きく成形物の強度が大きくなる。このファイバーについては，その粒度表示，粒度分布，粉碎動力分級特性，ファイバー充填層の空気透過抵抗やその強度，ファイバーの形状と繊維板の強度などの関係が，高橋，鈴木，遠藤らによって報告されている¹⁹⁻³⁷⁾。絡み合いをもたらず髭をだすためには，粉碎の前に木材を $6\text{kg}/\text{cm}^2$ 程度の飽和水蒸気で蒸煮する工程が必要であり，かつその条件は，それぞれの樹種に固有である。シナノキのような樹種は，比較的マイルドな条件が，カラマツでは過酷な条件が必要である。しかし，この樹種と蒸煮条件の関係についてはまだ明らかではなく，またその処理能力についての検討は行われていない。

最後は，衝撃型粉碎機による粉碎物（ハンマーミル片）である。この粉碎物は，切削型粉碎機や摩砕型粉碎機のような粉碎物の形状を制御する機構を持たず，最も単純な粉碎物といえる。

この衝撃型粉碎機は，その広い用途にも関わらず，粉体工学の分野においても，発表された組織的データは驚くほど少なく，基礎的研究はCallcott³⁸⁾，Obeng³⁹⁾，Jindal⁴⁰⁾，Austin⁴¹⁾，Shiflett⁴²⁾，空閑ら⁴³⁾，により行われたが，粉碎機設計におけるスケールアップのための相似則はまったくわかっていないのが現状である。ただ，田中ら⁴⁴⁾によりハンマー回転数，設備動力，粉碎機入り口面積，粉碎機重量等の処理能力に関する関与が与えられているのみである。

木材を衝撃型粉碎機で粉碎する場合について見てみる。斎藤⁴⁵⁾らは，本論文においてもとりあげたノボロータミルについて，粉碎物の大きさに及ぼす原料水分・目皿の大きさ・ハンマー回転数・ハンマー形状の影響について検討を行っているが，実験の規模が小さく，定量的な実験式の提示には至っていない。又木^{46,47)}らは，バッチ式の衝撃型粉碎機について，ハンマーの回転速度，固定刃と回転刃との間隙が粉碎物の粒度や形状に及ぼす影響について検討するとともに，連続目皿つき衝撃型粉碎機については，粉碎動力に及ぼす原料粒度や目皿の大きさ，ハンマー回転数の影響について報告している。また処理能力については，水本^{48,49)}らは，樹皮についてその種類・水分・大きさの影響について報告している。処

理能力の明確な定義がなされていないこと、また斎藤らと同様にその処理能力と取り上げた要因との定量的関係も提示していない。ただ又木⁵⁰⁾らは、滞留時間が粉碎機の能力と密接に結びつくと考え、その測定を行い、原料の供給速度との関係について供給速度がある値を超えると滞留時間は一定値を示すとの報告を行っており、これは、本論文の結果とも一致している。ただ、いずれの報告においても、粉碎機の最大処理能力の測定法が明確に定義されていないことから、最大処理能力と粉碎機の仕様・操作条件・原料物性との関係についての定量的関係を明らかにしてはいない。

1.4 本研究の目的

前述したように、北海道における木材利用の約7割は粉碎物としての利用である。その中で一番大きな割合をしめるのがパルプチップである。このパルプチップの価格は、最近の円高のなかで急激に下落しており、チップ生産業においては操業停止の状況に追い込まれている工場もある。このような状況の中で比較的順調に推移しているのが、チップ化の工程で副産される樹皮を粉碎して得られる家畜敷料であり、チップ生産業においてはパルプチップに替りうるこのような新しい粉碎物の用途を開拓することが急務となっている。そこで、木質飼料やノコズ生産、油吸着材、ボード工場の立地などが検討されている。また、資源のリサイクルや環境保全の立場から、木質系の解体廃材の再利用の必要性もたまってきている。この新しい用途においては、粉碎は欠くことのできない工程であるにもかかわらず、パルプ以外の木材の粉碎技術については、ほとんど理論的な検討はなされてきていない。本論文では、主に、安価で保守管理がしやすいため広く普及している、目皿付き衝撃型粉碎機について以下の検討を行った。

粉碎機に限らず、機械の重要な性能の一つはその時間あたりの処理能力である。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ある。しかし、この処理能力の定義は粉碎においては必ずしも明らかではなく、粉碎機相互の比較ができないのが現状である。本論文目的の第一は、この処理能力を明らかにすることである。

さらに、ほかの産業機械と同様に粉碎機についても実に様々な大きさや形式の機械が市販されている。粉碎機の大きさはこの処理能力と当然関係しているが、長さが2倍の粉碎機はその処理能力も2倍であろうか？本論文の二番目の目的は、粉碎機の形状と処理能力の関係を明らかにすることである。

本論文の第三番目の目的は、特定の粉碎機についてその操作条件と処理能力との関係を明らかにすることである。例えば、粉碎物の粒度を小さくしたい場合、その処理能力がどの程度低下するかといった問題である。

本論文の第四番目の目的は、粉碎原料が変わった場合の処理能力の変化を予測することである。例えば、樹皮を粉碎していた粉碎機で木質部を粉碎したいが、どの程度その処理能力が低下するかといった問題である。

本論文の第五番目の目的は、使用する原動機の出力の選定である。原動機の出力は大きい方が良いが、これはコスト高につながる。使用する粉碎機の処理能力に適合した粉碎機原動機出力で十分である。

以上が本論文の目的であるが、前述した新しい用途を開拓していくためには、上に述べた検討が従来に増して要求されている。

1.5 本研究の概要

1.5.1 最大処理能力算定方法の確立

第2章においては、粉碎機の最大処理能力の定義を行うとともに、木質粉碎物の粒度の定義を行う。

1.5.2 各種粉碎機における最大処理能力

第3章においては、先ず、衝撃型粉碎機についてその最大処理能力を求める実験式を示す。さらに、摩砕型粉碎機や切削型粉碎機についても、その操作条件と最大処理能力との関係を明らかにする。

1.5.3 各種粉碎機の適正原動機出力の推定

第4章においては、衝撃型粉碎機についてその適正原動機出力を求める実験式や、その目皿径と粉碎物の粒度について示す。さらに、摩砕型粉碎機や切削型粉碎機についてもその操作条件と適正原動機出力との関係を明らかにする。

1.6 本論文の範囲

本論文においては、目皿付き衝撃型粉碎機についてのみ数台の粉碎機について、粉碎機の操作条件、形状、粉碎原料の物性とその最大処理能力の関係を明らかにした。しかし、切削型粉碎機や摩砕型粉碎機においては、それぞれ1台の粉碎機について、その操作条件と最大処理能力、最大滞留量、滞留時間の関係の検討のみにとどまり、粉碎機の形状や、粉碎原料の物性がそれぞれに及ぼす影響については検討できなかった。

第2章 最大処理能力の算定方法の確立⁵¹⁾

2.1 最大処理能力の算定方法の確立

2.1.1 はじめに

既述したごとく機械や装置によって製品を生産する場合、まず問題となるのはその処理能力である。しかし、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ある”という程度の認識しかなかった。設備された原動機の出力が粉碎機の最大処理能力以上の場合においても、その最大処理能力以上の供給速度で粉碎原料が粉碎機に供給された場合、粉碎機内部に未粉碎原料が滞留し、その量は時間と共に増加する。そして、最終的には設備された原動機の出力を越え停止する。本項では、衝撃型粉碎機内の原料の滞留量の時間的変化からその最大処理能力を推定する方法について検討した。

2.1.2 供試木材

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工造林木であるカラマツ、トドマツ、およびトドマツ樹皮を用いた。これらの木質、および樹皮をパルプチッパーにて粗砕したのち、目開き5, 10, 20mのふるいをを用いて3種の粒度に分けて用いた。

第1表に実験に用いた原料の形状、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35%程度に調整した。

第1表 粉碎原料の形状
Table 1. Dimensions of raw materials.

樹種 Wood species	留分 Screen opening	長さ (mm) Length	幅 (mm) Width	厚さ (mm) Thickness	密度 (g/cm ³) Density *
シナノキ <i>Tilia japonica</i>	20mm on	42.0	16	3.7	0.305
	20~10mm	22.0	14	3.7	
	10mm pass	6.7	12	2.3	
ミズナラ <i>Quercus crispula</i>	20mm on	35.0	17	3.9	0.646
	20~10mm	19.0	13	3.4	
	10mm pass	7.5	12	2.3	
カラマツ <i>Larix leptolepis</i>	20mm on	29.0	18	4.4	0.390
	20~10mm	15.0	15	3.1	
	10mm pass	6.6	12	2.2	
トドマツ <i>Abies sachalinensis</i>	20mm on	25.0	22	3.2	0.326
	20~10mm	11.0	15	2.9	
	10mm pass	6.0	13	1.9	
トドマツ樹皮 Bark of <i>Abies sachalinensis</i>	20mm on	27.0	29	5.5	0.390
	20~10mm	22.0	16	3.8	
	10mm pass	14.0	8	2.2	

注：木材の繊維方向を長さとした。

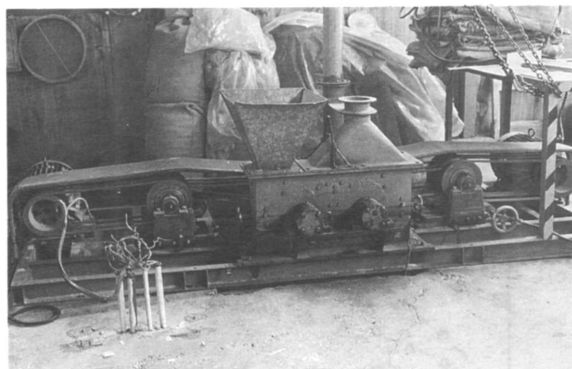
*：乾燥重量基準

Note：Length was measured along with the direction of wood fiber.

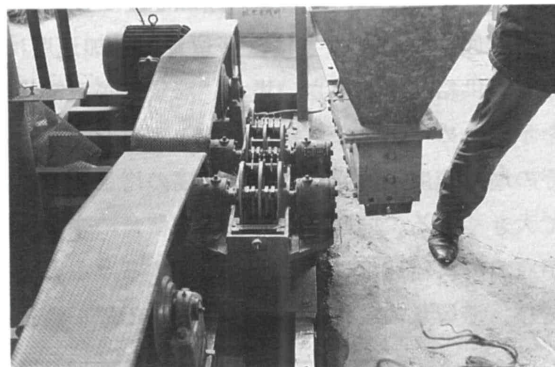
*：Based on oven-dry weight.

2.1.3 供試粉碎機

実験に用いた装置は、第3図、第4図に示した、ノボロータミルと呼ばれる比較的小型の目皿つきハンマーミルである。ノボロータミルは、パーティクルボードを製造する工程において、その表層の平滑度を増すために用いる細かい木粉を製造するために用いる。この粉碎機の仕様を第2表に示した。粉碎機の実験条件は以下のごとくである。粉碎機ハンマーの回転数を148, 210, 316rad/sとした。用いた目皿の形状はハンマーの回転方向に長い長方形でそれぞれ長さ幅の順で40×15mm, 30×10mmのものと50×10mmの円形のものを用いた。



第3図 ノボロータミル
Fig. 3. Novorotor Mill.



第4図 ノボロータミルの粉碎部
Fig. 4. Crushing part of Novorotor Mill

第2表 実験に用いた衝撃型粉碎機の仕様

Table 2. Specifications of hammer mills examined.

粉碎機 Mill	動力 Motor (kW)	直径 Diameter (m)	長さ Length : L (m)	回転数 Rotational speed : ω (rad/sec)	ハンマーの長さ Distance : r (m)	ハンマーの幅 Width : l (m)	ハンマーの数 Number of hammers : Nr	固定刃の数 Number of stators	回転刃と固定刃の間隔 Distance between hammer and stator (mm)
ノボロータミル Novorotor mill	11	0.3	0.24	148 210 316	0.15	0.123	56	24	5.0

2.1.4 実験方法

以下の方法で実験を行った。あらかじめ粉碎機を空転し、定常状態としたのち、定量供給機により原料を連続的に粉碎機へ供給した。粉碎機からの粉碎物の排出量は、排出物の重量をロードセルと記録計により連続的に測定した。

粉碎機内の滞留量 H_u の変化は、以下の方法で測定した。粉碎物の全重量を粉碎に要した時間で除し、粉碎機への平均供給速度 F を求めた。粉碎開始後の時間 t において、あらかじめ求めた平均供給速度 F によって得られた粉碎機への原料の供給量と、連続的に測定された粉碎物の積算重量 w との差より、粉碎機内の滞留量の変化を式(1)によって求めた。

$$H_u = F \times t - W \quad (1)$$

粉碎機の最大処理能力は F_{max} は、この粉碎機内のホールドアップの増加速度から求めた。

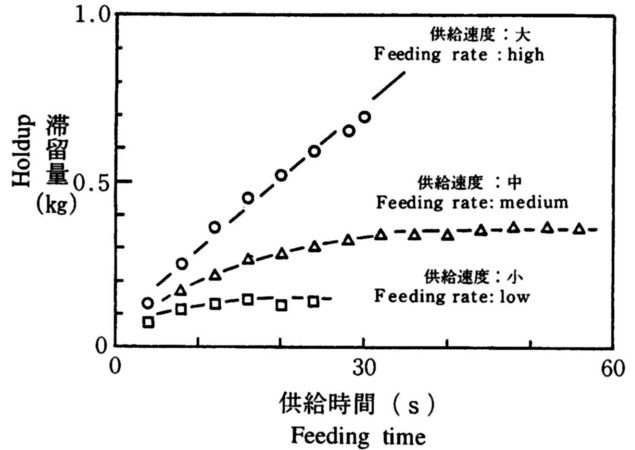
2.1.5 実験結果と考察

第5図には、粉碎機内の滞留量変化の一例を示した。粉碎機内の滞留量は、平均供給速度が小さい場合粉碎開始直後定常状態を示す。供給速度が増加するにつれ、定常状態が現われるまでの時間が長くなり、さらに供給速度を増加させると滞留量が時間とともに増加し続け粉碎機は停止した。

第6図には、粉碎機内の滞留量が定常状態をとらず、時間とともに増加する例を示した。パラメータは供給速度である。同図から滞留量の増加速度を求めた。

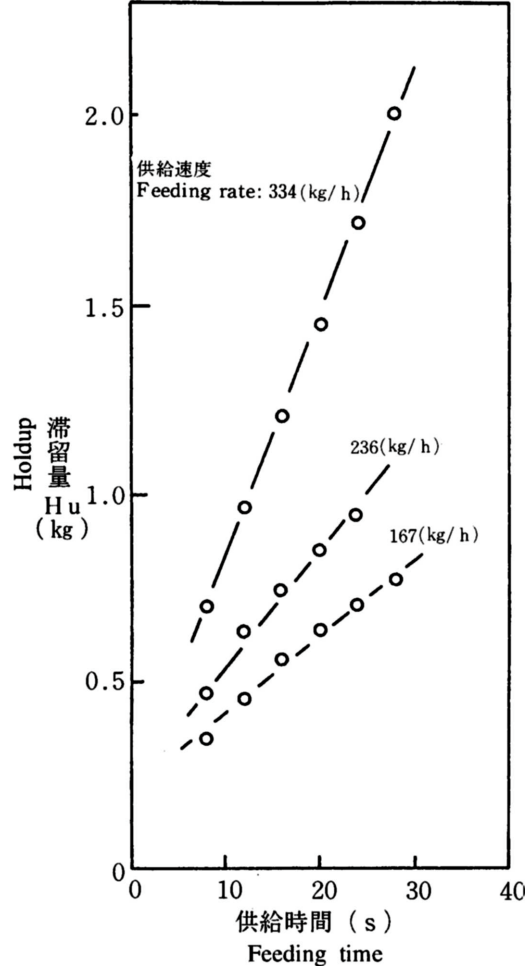
滞留量の時間的変化は、原料の供給速度と粉碎機の処理能力との差によって生ずるものと考えられる。そこで供給速度と、滞留量の増加速度との関係の一例を第7図に示した。

第7図に示したように、滞留量の増加速度は、原料の供給速度が小さい場合、滞留量が定常状態を示すためゼロとなるが、ある一定値を超えるとその増加速度は、原料の供給速度の増加に比例して大きくなる。同図において、滞留量の変化速度が原料の供給速度に比例して増加する点を直線で結び、滞留量の変化速度がゼロとなる原料供給速



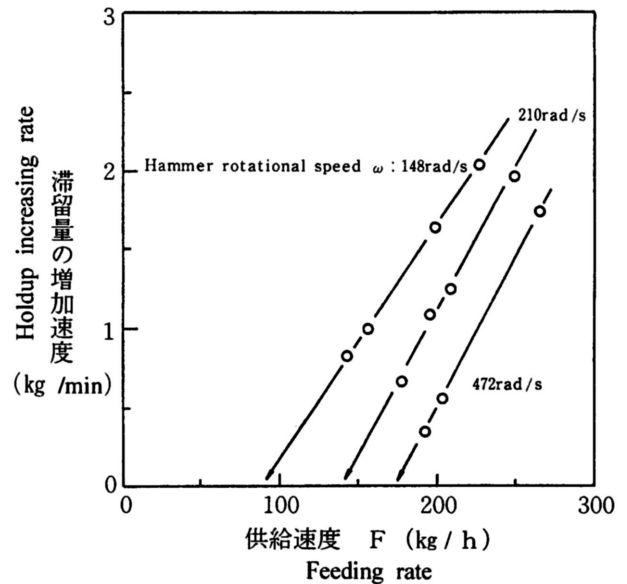
第5図 粉碎機内の滞留量変化
Fig.5. Holdup changes in the crusher.

注：カラマツ：10~20mm
ノボロータミル：148rad/s, 10mm φ 目皿
Legend: *Larix leptolepis*: 10~20mm
Novorotor mill: 148rad/s, 10mm φ screen equipped.



第6図 粉碎機内の滞留量の増加
Fig.6. Holdup increasings in the crusher.

注：ミズナラ：10mm pass
ノボロータミル：148rad/s, 10mm φ 目皿
Note: *Quercus crispula*: 10mm pass
Novorotor mill: 148rad/s, 10mm screen equipped.



第7図 滞留量の増加速度と供給速度との関係
Fig.7. Relationships between holdup increasing rate and feeding rate.

注：カラマツ：10~20mm
ノボロータミル：10mm φ 目皿
Legend: *Larix leptolepis*: 10~20mm
Novorotor mill: 10mm φ screen equipped

度を外挿によって求めた。原料をこの供給速度以下で粉碎機に供給する場合は、粉碎機内の滞留量は定常状態をとり一定値であるため粉碎機が停止することはない。しかし、この供給速度を超える速度で原料を供給すると、粉碎機内に未粉碎原料が溜り始め、その量は時間とともに増加し最終的には粉碎機を停止させてしまう。従って、この供給速度がこの粉碎機の最大処理能力といえる。そこで、この供給速度をこの粉碎機の最大処理能力 F_{max} と定義し、以下この方法を用いて最大処理能力を測定した。

2.2 木質粉碎物の形状と粒度表示⁽⁶²⁾

2.2.1 はじめに

前項において、目皿付き衝撃型粉碎機の最大処理能力を定義した。本項においては、この定義した最大処理能力と粉碎機の仕様や操作条件との関係について検討し、例えば、与えられた目皿付き衝撃型粉碎機についてはその最大処理能力を推定し、新たに目皿付き衝撃型粉碎機を設計する場合にはその設計指針を提案するものである。その検討に入る前に、木質粉粒体の大きさを定義しなければならない。通常の粉粒体はほぼ球形に近似することが可能であり、通常ふるい分けによりその直径を測定することができる。しかし、木材を粉碎機によって粉碎する場合には、繊維方向の強度が大きいため、粉碎物の形状は繊維方向が長く、球形に近似できない形状をとる。一般にこのような形状の粉粒体を、球形近似可能な一般の粉粒体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る。本項では、木質粉碎物の形状を測定し、ふるい分けによってその球相等径を測定する方法について検討した。

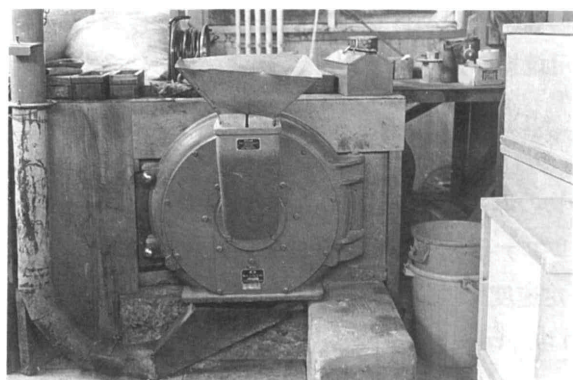
2.2.2 供試木材

実験に用いた原料は、前項に用いた原料と同じである。

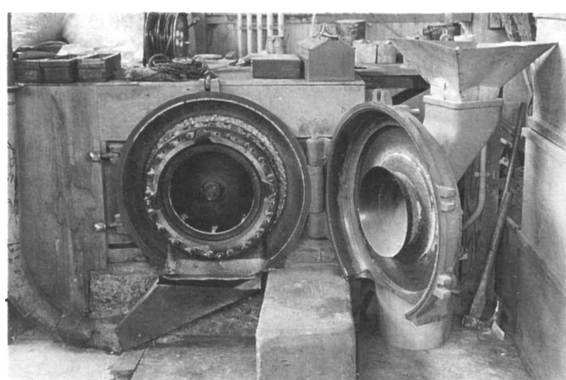
2.2.3 供試粉碎機

実験に用いた粉碎機は、木材工業において一般的に用いられている粉碎機の中より、木材に加えらるる粉碎力が異なる代表的な3種の機種を選定した。切削タイプとして第8図、第9図に示したパールマンチッパーを、衝撃タイプとして第10図、第11図に示したハンマーマイルを、摩砕タイプとして第12図、第13図に示したダブルディスクリファイナーを用いた。

パールマンチッパーに投入された原料は、インペラーと呼ぶ内蔵された回転羽根により円周方向へ飛ばされ、インペラーと逆方向に回転する円筒にとりつけられた刃物により厚さ方向スライスされる仕組みになっている。回転刃の直径は約50cmであり、ほぼ実用規模の大きさである。粉碎物の大きさは、こ



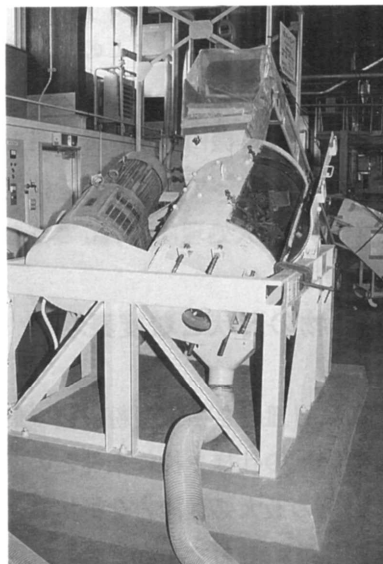
第8図 パールマンチッパー
Fig. 8. Pallmann chipper.



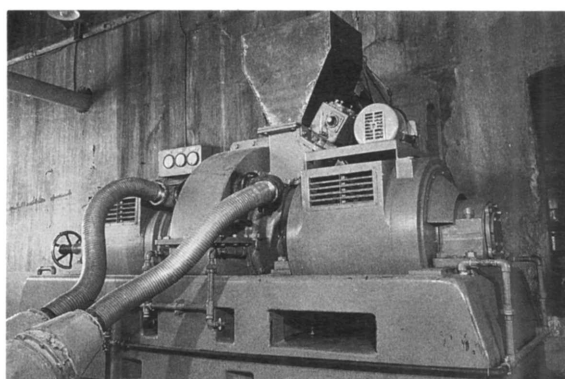
第9図 パールマンチッパー
Fig. 9. Crushing part of Pallmann Chipper



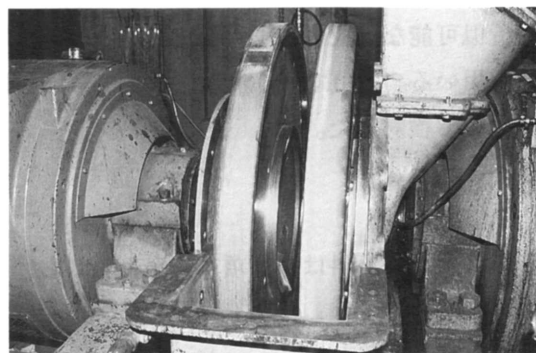
第10図 ハンマーミル
Fig.10. Hammer mill.



第11図 ハンマーミルの粉碎部
Fig.11. Crushing part of hammer mill.



第12図 ダブルディスクリファイナー
Fig.12. Double disk refiner.



第13図 ダブルディスクリファイナーの粉碎部
Fig.13. Crushing part of double disk refiner.

の円筒からの刃物の刃先の出し方（刃出し）によって調整した。

実験に用いた目皿付き衝撃型粉碎機はユニバーサルクラッシャー（商品名）と呼ばれる実用規模のハンマーミルである。

ダブルディスクリファイナーは、パルプ工業における代表的粉碎機である。粉碎室は互いに逆方向に回転する2枚の多数の溝を有する円盤よりなり、原料はこの2枚の円盤の中心部より供給され円盤と円盤（摩砕盤）の間でせん断力により粉碎される機構となっている。粉碎物の大きさは2枚の円盤の間隙により調整する。回転円盤の直径は約90cmであり、実用規模の大きさである。

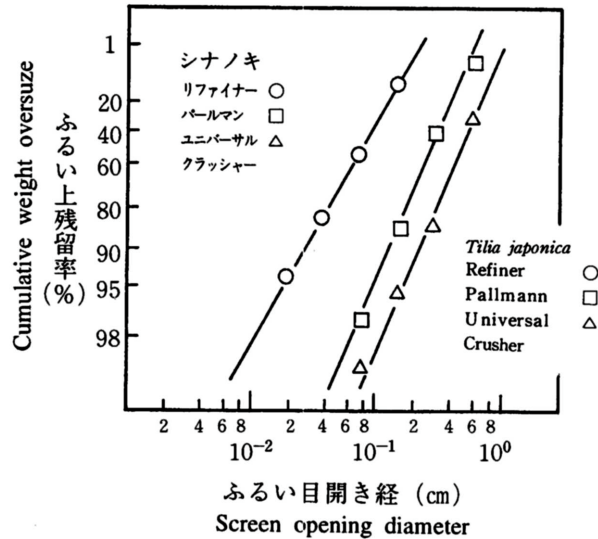
2.2.4 実験方法

粉碎機の条件は、パールマンチッパーについては粉碎物の厚さを規制する刃出しを2条件、ユニバーサルクラッシャーでは回転数を3条件、ダブルディスクリファイナーでは、摩砕部の2枚の摩砕盤の間隙を3条件設定した。粉碎は原料を定量供給機により一定速度で供給し、連続粉碎した後、粉碎物を気乾状態（大気中における平衡水分で8%程度）としたのち、ロータップ型ふるい振とう機で約30分振とうし、その粒度分布を求めた。

2.2.5 実験結果と考察

第14図には、粉碎物の粒度分布の一例をシナノキについてRosin - Rammler粒度線図上に示した。それぞれの粒度分布は、ほぼ同じ傾向を示しているが、ダブルディスクリファイナーによる粉碎物については、分布の幅が若干広い。しかし、木材の粉碎物についても、通常の粉粒体の粒度分布の測定に用いられるRosin - Rammler分布が適用されることが分かった。

木材は、その繊維方向の強度と繊維に直角方向の強度に約10倍程度の差があるため、粉碎物の形状は繊維方向が長い長方形となる。従って、通常のふるい分けのみでは、粉碎物の大きさは特定できない。そこで、通常のふるい分け試験とともに、ふるい分けされた粉碎物の大きさを直接測定した。



第14図 粉碎物の粒度分布
Fig. 14. Size distribution of the products.

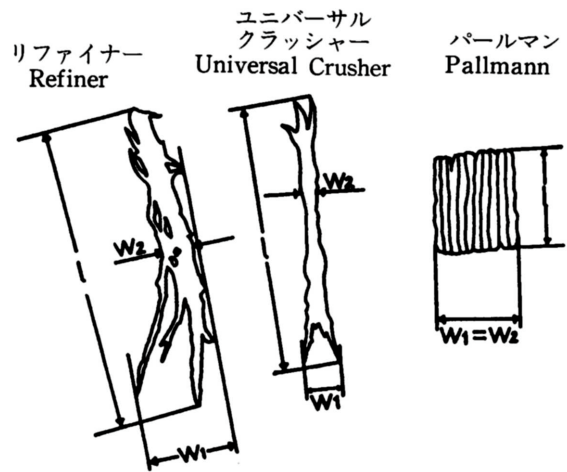
第15図には、各粉碎機による粉碎物の代表的な形状の模式図と、幅 w_1 と w_2 と長さ l について示した。

リファイナーによる粉碎物は、“髭”と称される細長い繊維の派生した複雑な形状となっており、この場合は、 w_2 はファイバー骨格部の平均的な幅を、 w_1 は骨格と髭が占有する面積をも含めた最大幅である。

ユニバーサルクラッシャーによる粉碎物は、リファイナーによる粉碎物のような極端な髭は見られないが、粉碎物の端部にはそのようなものが見られる。ユニバーサルクラッシャーについても、 w_2 は骨格部の平均的な幅を、 w_1 は骨格と髭が占有する面積をも含めた最大幅である。

パールマンによる粉碎物は、ほかの粉碎機による粉碎物のような髭は見られず、ほぼ $w_1 = w_2$ であった。

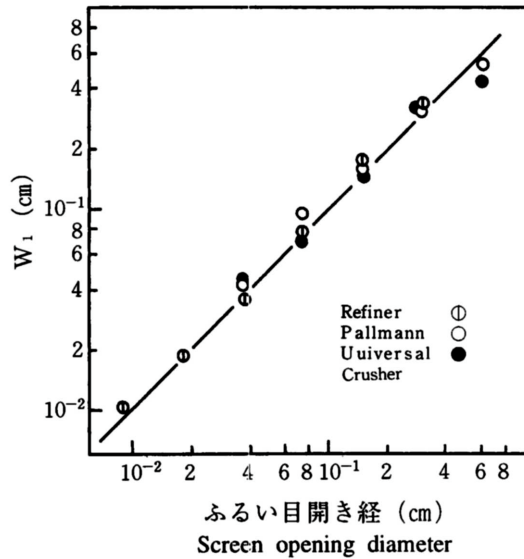
木質粉碎物は、前述のような長方形となるため、ふるい分けのみでは粉碎物の大きさを特定できない。木質粉碎物のふるい分けでは、粉碎物の幅で分けられているのか、厚さで分けられている



第15図 粉碎物の形状
Fig. 15. Shape of the particles.

のかが問題となる。

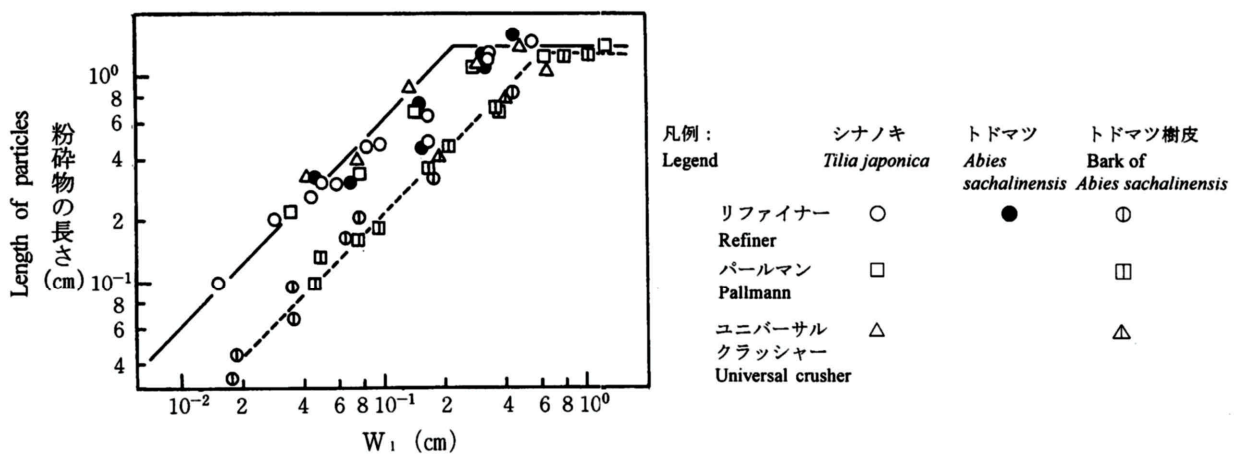
そこで、粉碎物の各寸法とふるい目開き径との関係を調べたところ、粉碎物の骨格と髭が占有する面積をも含む最大幅、すなわち w_1 がふるい目開き径と1対1に対応することが分かった。第16図には、パールマン、リファイナー、ユニバーサルクラッシャーの各粉碎機の各フラクションにおける w_1 の実測値と目開き径との関係を示した。このことにより、木質粉碎機のふるい分けは、粉碎機がふるい目を粉碎物が縦にすりぬけるように通過する機構であると考えられる。次に、各フラクションにおける粉碎物の、長さ l 、厚さ t 、および w_1 、 w_2 相互の関係を調べた。



第16図 ふるい目開き径と w_1 との関係

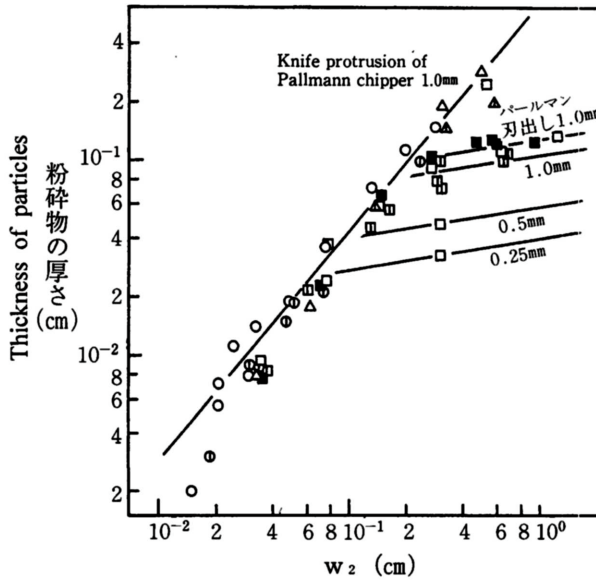
Fig.16. Relationships between screen opening diameter and w_1 .

第17図には w_1 と長さ l との関係を示した。同図より、木質粉碎機については、樹種、粉碎機によらず w_1 と長さ l は、一義的関係を示すが、樹皮の場合その長さは、木材の1/4であった。このことは樹皮の繊維方向の強度が木材より小さいためと考えられる。長さの最大値が現れるのは、原料チップの繊維方向の長さが15m程度であったことによるためであろう。さらに、 w_1 と厚さ t との関係を求めたところ良好な関係は得られず、厚さ t は w_1 よりも w_2 すなわち骨格部の幅と良好な相関を有することが見いだされた。



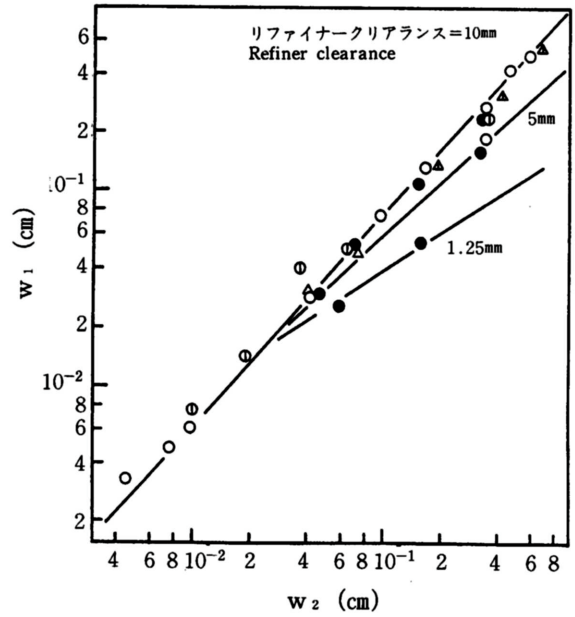
第17図 w_1 と粉碎物の長さとの関係

Fig.17. Relationships between w_1 and length of particles.



第18図 w_2 と粉砕物の厚さとの関係
Fig.18. Relationships between w_2 and the thickness of particles.

凡例: Legend	シナノキ <i>Tilia japonica</i>	トドマツ <i>Abies sachalinensis</i>	トドマツ樹皮 Bark of <i>Abies sachalinensis</i>
リファイナー Refiner	○	●	⊙
パールマン Pallmann	□		⊠
ユニバーサル クラッシャー Universal crusher	△		▲



第19図 w_1 と w_2 との関係
Fig.19. Relationships between w_1 and w_2 .

凡例: Legend	シナノキ <i>Tilia japonica</i>	トドマツ <i>Abies sachalinensis</i>	トドマツ樹皮 Bark of <i>Abies sachalinensis</i>
リファイナー Refiner	○	●	⊙
ユニバーサル クラッシャー Universal crusher	△	▲	⊠

第18図には、 w_2 と厚さ t との関係を示した。この場合、パールマンチップパーによる粉砕物は、厚さ方向に刃物でスライスしていく方式であるため、刃出しにより厚さが変化する。しかし、その他については、粉砕機種によらず一義的相関を有しているといえる。さらに第19図には w_1 と w_2 との関係を示した。パールマンチップパーによる粉砕物は $w_1 = w_2$ 、また、同図よりユニバーサルクラッシャー、およびリファイナーの間隙10mmの条件については w_2 は w_1 の約80%、リファイナーの間隙の小さい条件においては同図に示したように、この相関から大きくはずれることが分かった。

以上の結果より、粒度分布の測定により50%重量径 d_{50} を求めれば、その目開き径に対応する粉砕物の形状が第16図～第19図の結果から求めることができる。粉砕物の形状はほぼ長方形と考えられるので、その体積は、 $w_2 \times l \times t$ で求められる。そこで、粉砕物の大きさを50%重量径 d_{50} に対応する粉砕物の体積を基準とした球相等径 d_t とした。

第3章 各種粉砕機における最大処理能力

3.1 衝撃型粉砕機における最大処理能力

3.1.1 衝撃型粉砕機における滞留時間と粉砕機操作条件の関係⁵³⁾

3.1.1.1 はじめに

衝撃型粉砕機の最大処理能力は、前章に示したように、滞留量の増加速度から求めることができる。この最大処理能力は第20図に示したように、二つの要素から成り立っている。その一つは粉砕機が許容できる最大の滞留量である。もう一つは、この滞留量が所定の粒度に粉砕され粉砕機から排出されるまでの滞留時間である。本項においてはこの滞留時間と粉砕機形状の関係について検討する。

粉砕過程の解析に用いる破砕関数 $B(y, x)$ 、選択関数 $S(y, t)$ として、古谷らは⁵⁴⁾、次式を与えている。ただし、 y は原料の大きさ、 x は粉砕物の大きさ、 t は粉砕時間である。

$$B(\gamma, \chi) = \left(\frac{\chi}{\gamma}\right)^m \quad (2)$$

$$S(\gamma, t) = K^* \gamma^n \quad (3)$$

定数 m と n が等しい場合、回分粉砕のマスバランスをとった方程式の解は次式で示される。

$$R(\chi, t) = R(\chi, 0) \exp(-K\chi^n t) \quad (4)$$

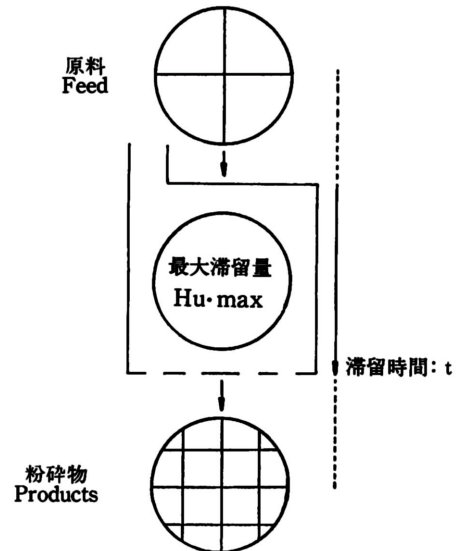
ただし、 $R(x, t)$ は x より大きい粉砕物の粉砕物全体に対する比率である。供給物および粉砕物の粒度がRosin-Rammler粒度分布に従うとし、供給物の36.8%重量径における球相等径を D_e 、分布定数を N 、粉砕物の50%重量径における球相等径を d_v で表すこととして、式(4)の両辺の対数をとれば d_v の t による変化は次式で与えられる。

$$\frac{0.693 - \left(\frac{d_v}{D_e}\right)^N}{t} = K^* d_v^n \quad (5)$$

そこで衝撃型粉砕機において、滞留量が定常状態を示す場合において、その滞留時間が上式の粉砕時間 t であるとして式(5)により定数 n や K^* を求め、操作条件や粉砕機の仕様との関係を調べた。

3.1.1.2 供試粉砕機と実験条件

実験には、3種の目皿付き衝撃型粉砕機を用いた。用いた粉砕機の基本仕様と操作条件を第3表に示した。それぞれについてその構造、実験に用いた試料、並びに実験条件について以下に説明する。



第20図 粉砕機のモデル
Fig.20. A model of crushing mill.

()ユニバーサルクラッシャー

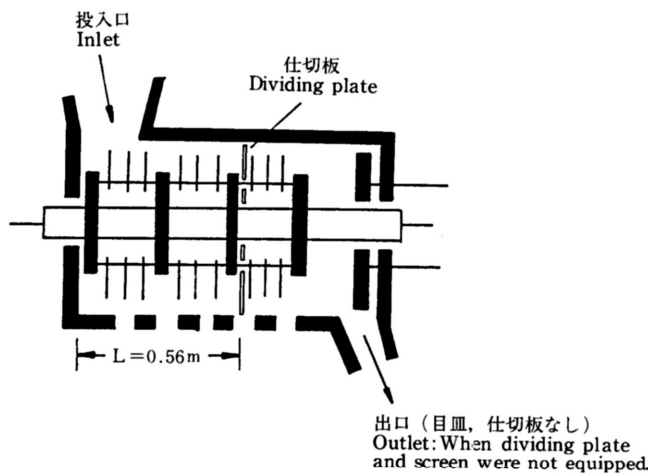
ユニバーサルクラッシャーの断面図を第21図に示した。この粉碎機は、回転するハンマーによって与えられる衝撃力で原料を粉碎する機構である。この粉碎機においては、同図に示したように仕切り板を粉碎機内部に設置することで、粉碎物が目皿部から排出される状態と、仕切り盤を外し、目皿部を遮蔽し、粉碎物が出口から排出される、二つの状態で実験を行った。

実験に用いた木材は、カラマツおよびシラカンバである。原料としては、チップとチップを10mmの目皿を付けた衝撃型粉碎機で粉碎したものをを用いた。含水率は35%程度に調整した。

以下の操作条件が定数 n や k^* に及ぼす影響について検討を加えた。

目皿の大きさ並びにその開孔比の影響については、目皿の開孔比を、5、25、37および42%の4条件、目皿径は6、10および20mm について検討した。そのほかの条件は第3表の仕様と同一とした。

粉碎機の内面に設置した固定刃と回転刃との間隙の影響については、回転刃の長さを変えその間隙を変えた。間隙は、基本仕様の9mmのほかに、18、26mmの3条件とした。そのほかの条件は第3表の仕様と同一とした。



凡例：L：粉碎部の長さ
Legend：L：Length of crushing part.

第21図 ユニバーサルクラッシャーの断面図
Fig.21. Sectional plan of Universal Crusher.

第3表 実験に用いた衝撃型粉碎機の仕様
Table 3. Specifications of hammer mills examined.

粉碎機	動力	直径	長さ	回転数	ハンマーの長さ	ハンマーの幅	ハンマーの数	固定刃の数	回転刃と固定刃の間隔	目皿の直径	目皿の開孔比
Mill	Motor (kW)	Diameter (m)	Length : L (m)	Rotational speed : ω (rad/s)	Distance : r (m)	Width : l (m)	Number of hammers : Nr	Number of stators	Distance between hammer and stator (mm)	Open-size of screen (mm)	Opening area ratio of screen : Sr (%)
ノボロターミル Novorotar mill	11	0.3	0.24	148	0.15	0.123	56	24	5.0	10.0	27
ユニバーサルクラッシャー Universal crusher	22	0.68	0.79	178	0.34	0.123	52	8	9.0	10.0	42
ウルトラプレックス Ultraplex	18.5	0.62	0.11	754	0.31	0.11	26	24	5.0	0.4	6

目皿を用いない場合については、第21図において目皿部を遮蔽し、仕切り盤をはずし、粉碎物が出口から排出されるようにして実施した。そのほかの条件は第3表の仕様と同一とした。

ハンマーの回転数については、125, 136, 157, 178および209rad/sの4条件（回転数としては1200, 1300, 1500, 1700および2000rpmの4条件）とし、そのほかの条件は第3表の仕様と同一とした

() ノボロータミル

実験に用いたノボロータミル、ウルトラプレックスはともに基本的にはユニバーサルクラッシャーと同様に、衝撃力を与える回転ハンマーと、製品の粒度を規制する目皿を有した衝撃型粉碎機である。

ノボロータミルは、パーティクルボードを製造する工程において、その表面の平滑度を増すために用いる細かい木粉を製造するために用いる。

ノボロータミルの実験に用いた樹種は、前章に用いた原料と同じである。ハンマーの回転数は、基本仕様である149rad/sのほか209, 262および314rad/sとした。

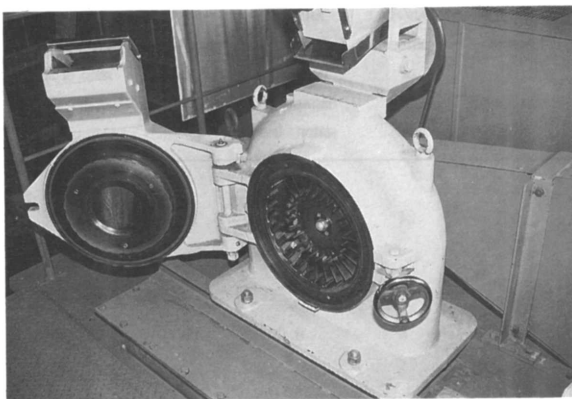
() ウルトラプレックス

第22図に示したウルトラプレックスは、高速で回転するハンマーによる大きい衝撃力で、有機物・無機物を問わず粉碎できる実用規模の微粉碎機である。

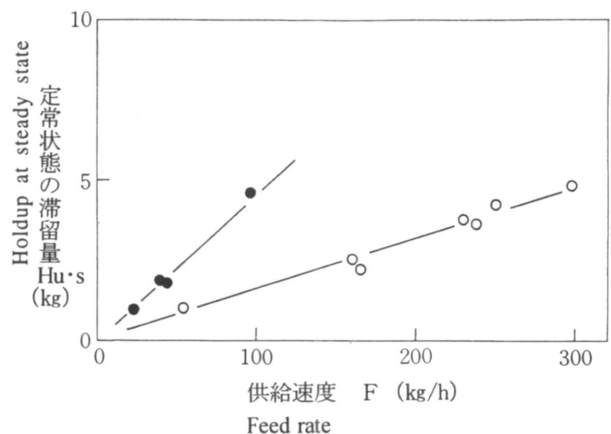
ウルトラプレックスの実験に用いた木材は、トドマツとミズナラのチップを1.5, 5.5, 10mmの目皿を有する粉碎機で粗砕し用いた。目皿は基本仕様の0.4mのほか0.2m, ハンマーの回転数は基本仕様の754rad/s (7000rpm) のほか524 (5000rpm) および367rad/s (3500rpm) とした。

() 滞留時間の測定

前章において述べたように、粉碎機内の滞留量は、平均供給速度が小さい場合粉碎開始直後定常状態を示す。供給速度が増加するにつれ、定常状態が現われるまでの時間が長くなり、さらに供給速度を増加させると滞留量が時間とともに増加し続け粉碎機は停止した。第23図には、定常状態の滞留量 $H_{u,s}$ と、平均供給速度 F との関係を示した。定常状態の滞留量と、平均供給速度とは比例する関係を示している。この比例関係は、粉碎機が最大処理能力以下で操業している場合においては、原料の粉碎機内での滞留時間は一定であることを示している。滞留時間は、この定常状態の滞留量を測定し、その値を平均供給速度で除して求めた。



第22図 ウルトラプレックス
Fig.22. Ultraplex.



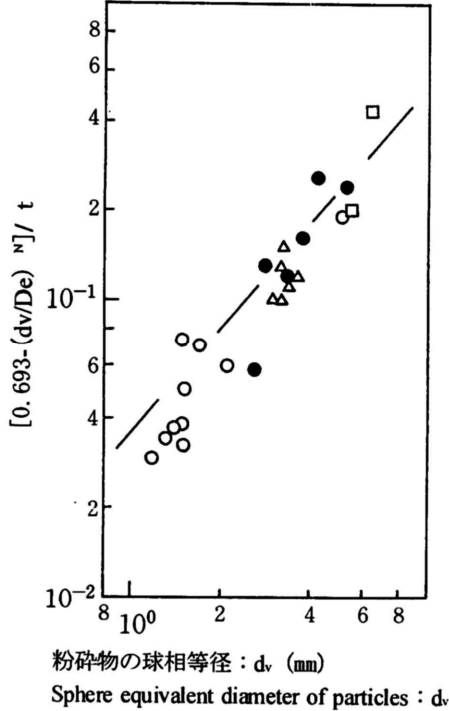
第23図 供給速度と定常状態の滞留量との関係
Fig.23. Relationships between feed rate and the holdup at steady state.

注：ユニバーサルクラッシャー Universal crusher
カラマツ *Larix leptolepis*
○ : 10mm φ 目皿 ○ : 10mm φ Screen equipped
● : 6mm φ 目皿 ● : 6mm φ Screen equipped

3.1.1.3 実験結果と考察

第24図には、ユニバーサルクラッシャーにおける式(5)の関係を示した。同図によると、粉碎部の長さ
と回転数が一定の条件下では、開孔比、間隙、目皿の有無の定数 k^* 、 n に及ぼす顕著な影響は見いだせず、
図示のごとく定数 k^* 、 n は一定、 n の値はほぼ1.3であった。

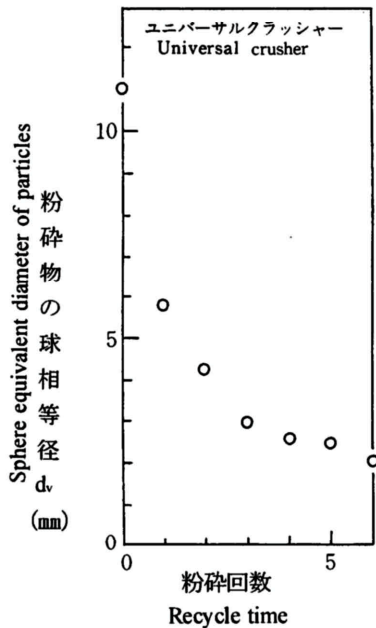
第25図には、ユニバーサルクラッシャーにおいて、目皿を用いず繰り返し粉碎を行った場合の粒度の



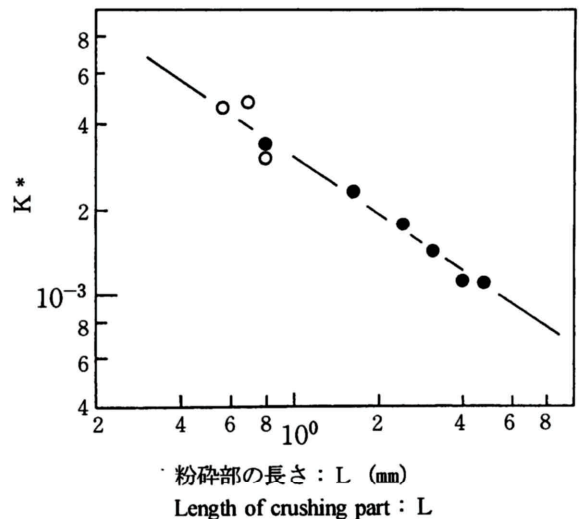
注：ユニバーサルクラッシャー， ω ：178 (rad/s)
 凡例：○：カラマツ（開孔比を変えた場合）
 ●：シラカンバ（開孔比を変えた場合）
 △：カラマツ（回転刃と固定刃との間隙を変えた場合）
 □：カラマツ（目皿を用いない場合）
 Note：Universal crusher， ω ：178 (rad/s)
 Legend：○：Larix leptolepis (Screen opening ratio was changed).
 ●：Tilia japonica (Screen opening ratio was changed).
 △：Larix leptolepis (Clearance between rotor and stator was changed).
 □：Larix leptolepis (Screen was not equipped).

第24図 粉碎物の球相等径と $[0.693 - (d/D_s)^n] / t$ との関係

Fig. 24. Relationships between sphere equivalent diameter of particles and $[0.693 - (d/D_s)^n] / t$.



第25図 粉碎回数と粉碎物の球相等径との関係
 Fig. 25. Relationships between recycle time at crushing and sphere equivalent diameter of particles.



第26図 粉碎部の長さ k^* との関係
 Fig. 26. Relationships between length of crushing part and k^* .

注：ユニバーサルクラッシャー Universal crusher
 Note ○：目皿なし ○：Screen not equipped
 ●：目皿あり ●：Screen equipped

変化を示した。ただし、繰り返し回数0における粒度は原料の粒度である。定数nは一定とし、式(5)において D_e およびNを一度目の粉碎時における原料の値、粉碎時間tを繰り返しを繰り返しM回までの滞留時間tの総和とし、定数 K^* を求めた。M回の繰り返し粉碎は、粉碎部の軸方向の長さをM倍したものと仮定し、第26図に粉碎部の長さLと定数 K^* との関係を示した。同図には目皿付きの状態での粉碎機内部に仕切り板を設け、1回のみでの粉碎を行った実験についても示した。第26図によると、定数 K^* は、目皿の有無によらず、粉碎部長さLの約 $2/3$ 乗に比例する傾向を示している。従って式(5)における定数 K^* は次式によって示される。

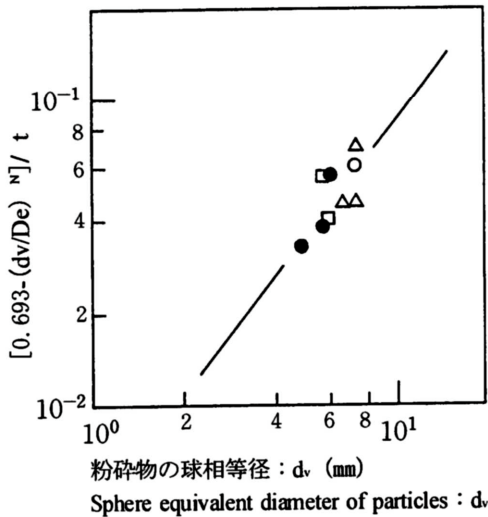
$$K^* = kL^{-\frac{2}{3}} \quad (6)$$

第27図、第28図にはノボロータミル、ウルトラプレックスにおける式(5)の関係を示した。同図によると定数nはユニバーサルクラッシャーにおける値と同様に約1.3であった。従って定数nは、樹種および今回とりあげた粉碎機についてはほぼ一定値であると思われる。ただし定数 K^* は3種の目皿付き衝撃型粉碎機において大きな差異を示している。第29図には、今回取り上げた全粉碎機の粉碎部長さより式(6)によって定数kを求め、定数kとハンマーの回転数との関係を示した。ただし、粉碎回数は一回のものである。第29図によると定数kはハンマーの回転角速度の約2乗に比例する傾向を示した。従って、式(6)における定数 K^* は、次式によって示される。

$$K^* = \frac{1}{C} \omega^2 L^{-\frac{2}{3}} \quad (7)$$

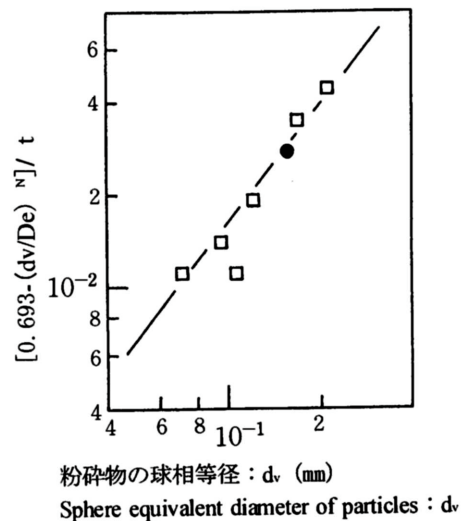
従って式(5)は滞留時間について書き直すと次式ようになる。

$$t = \frac{C \left[0.693 - \left(\frac{d_v}{D_e} \right)^n \right]}{d_v^{1.3} \omega^2 L^{-\frac{2}{3}}} \quad (8)$$



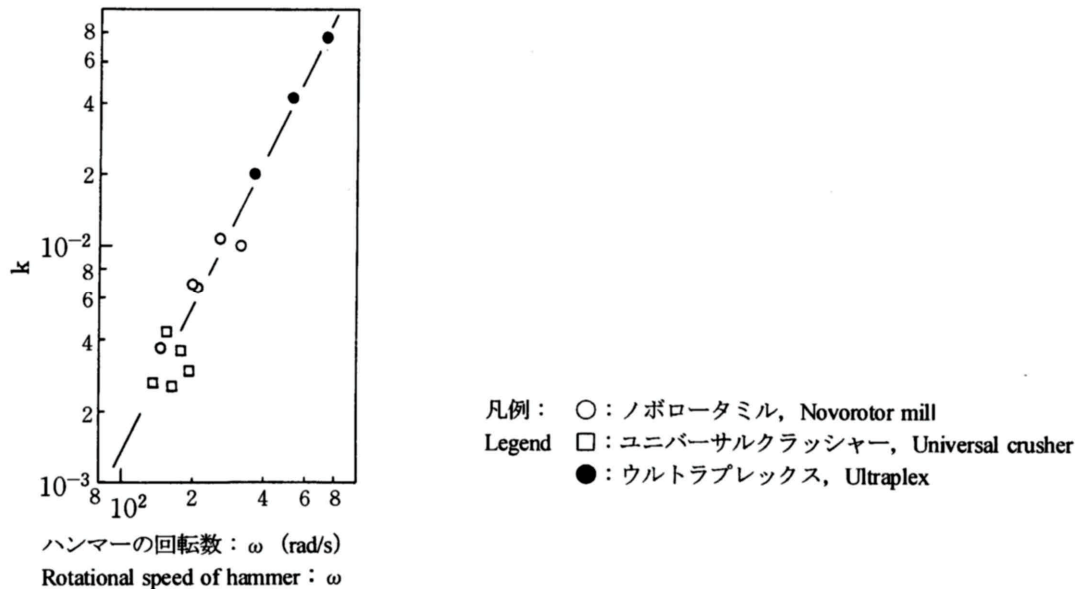
第27図 ノボロータミルにおける粉碎物の球相等径と $[0.693 - (d_v/D_e)^n] / t$ との関係
 Fig. 27. Relationships between sphere equivalent diameter of particles crushed by Novorotor Mill and $[0.693 - (d_v/D_e)^n] / t$.

凡例: ●: ミズナラ, *Quercus crispula*
 Legend △: シナノキ, *Tilia japonica*
 □: トドマツ, *Abies sachalinensis*
 ○: カラマツ, *Larix leptolepis*



第28図 ウルトラプレックスにおける粉碎物の球相等径と $[0.693 - (d_v/D_e)^n] / t$ との関係
 Fig. 28. Relationships between sphere equivalent diameter of particles crushed by Ultraplex and $[0.693 - (d_v/D_e)^n] / t$.

凡例: ●: ミズナラ, *Quercus crispula*
 Legend □: トドマツ, *Abies sachalinensis*



第29図 ハンマーの回転数とkとの関係

Fig. 29. Relationships between rotational speed of hammer and k.

3.1.2 衝撃型粉碎機の形状と最大滞留量の関係⁵⁵⁾

3.1.2.1 はじめに

筆者は前章において目皿付き衝撃型粉碎機の滞留量の増加速度から粉碎機の最大処理能力を求める方法を提案した。前述した第20図に示したように、目皿付き衝撃型粉碎機の最大処理能力は二つの要素によって成立している、一つは粉碎機に收容された原料が入ってから粉碎されて出て行くまでの滞留時間 t と、もう一つは粉碎機内に粉碎機が最大限許容できる粉碎原料の滞留量、最大滞留量 $H_{u, \max}$ である。粉碎機の最大処理能力はこの二つの要素を用いて次式で示される。

$$F_{\max} = \frac{H_{u, \max}}{t} \quad (9)$$

前項においては、この滞留時間と粉碎機の操作条件、形状との関係について報告した。本項においては、残りの最大滞留量について検討する。

3.1.2.2 供試粉碎機と木材

実験に用いた粉碎機の仕様、操作条件を第4表に示した。ユニバーサルクラッシャーは、家畜敷料等の製造に用いられる実用規模の粉碎機、ウルトラプレックスは実用規模の微粉碎機である。ウイレイミルは試料分析等において用いられる実験室規模の粉碎機で、通常は刃を鋭利な状態で使用するが、本実験では刃先を落し切削ではなく衝撃で粉碎するように設定した。

ノボロータミルを用いた実験では、前章に用いた原料と同じ試料を、ユニバーサルクラッシャーを用いた実験では、カラマツチップを用いた。ただし、ユニバーサルクラッシャーにおいて目皿の開孔比の検討においては、カラマツチップを同粉碎機で目皿10mで粉碎したものをを用いた。それぞれの粒度特性数における球相等径 D_0 は、カラマツチップ粉碎物は3.6m、カラマツチップ11mmである。含水率は35%程度に調整した。

ウルトラプレックスを用いた実験では、トドマツチップを5.5mの目皿を有する粉碎機で粗砕し用いた。その粒度特性数における球相等径 D_0 は2.1mmである。

第4表 実験に用いた衝撃型粉碎機の仕様

Table 4. Specifications of hammer mills examined.

粉碎機	動力	直径	長さ	回転数	ハンマーの長さ	ハンマーの幅	ハンマーの数	固定 刃の数	回転刃と固定 刃の間隔	目皿の直径	目皿の開孔比
Mill	Motor (kW)	Diameter (m)	Length : L (m)	Rotational speed : ω (rad/s)	Distance : r (m)	Width : l (m)	Number of hammers : Nr	Number of stators	Distance between hammer and stator (mm)	Open-size of screen (mm)	Opening area ratio of screen : Sr (%)
ノボロターミル Novorotar mill	11	0.3	0.24	148	0.15	0.123	56	24	5.0	5.0	22
				210						10.0	27
				263							
				316							
ユニバーサル クラッシャー Universal crusher	22	0.68	0.79	84	0.34	0.123	52	8	9.0	6.0	5
				126						10.0	11
				178						20.0	17
				210						50.0	37
										42	
ウルトラプレックス Ultraplex	18.5	0.62	0.11	367	0.31	0.11	26	24	5.0	0.1	2
				524						0.2	6
				754						0.4	11
ウレイミル Willey mill	0.4	0.14	0.05	104	0.07	0.048	4	4	0.5	0.6	14
										1.1	23
										1.4	26
										2.1	33
										5.3	38
		10.0	45								

ウレイミルを用いた実験では、カラマツチップをユニバーサルクラッシャーにて目皿10mmの条件で粉碎し、ふるいにより5~9, 9~16, 16~32メッシュにふるいわけしたものをを用いた。それぞれの粒度特性数における球相等径 D_0 は2.5, 1.6, 1.1mmである。

3.1.2.3 最大滞留量の測定

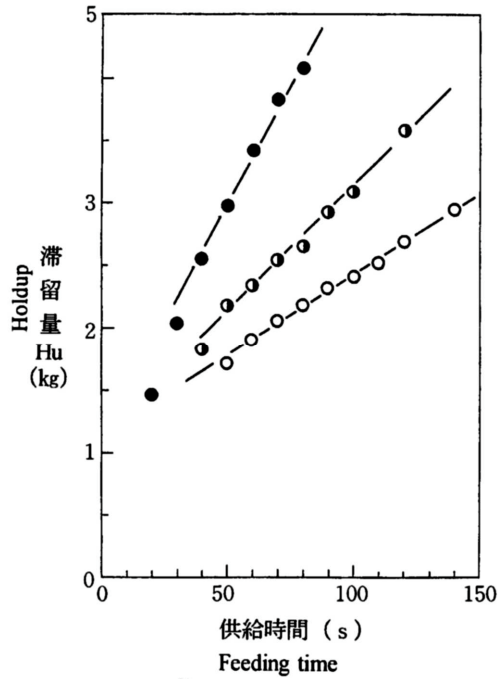
以下の方法で最大滞留量の測定を行った。

本実験においても、供給速度と滞留量との関係は、従来と同様の関係を示した。すなわち、粉碎開始直後定常状態をとる場合と、比較的短時間で定常値を示す場合、定常値を示さず増加しつづける場合の3状態である。

第30図には、滞留量が定常値を示さず、粉碎時間とともに増加しつづける例を示した。前項と同様に同図より滞留量の増加速度を求めた。

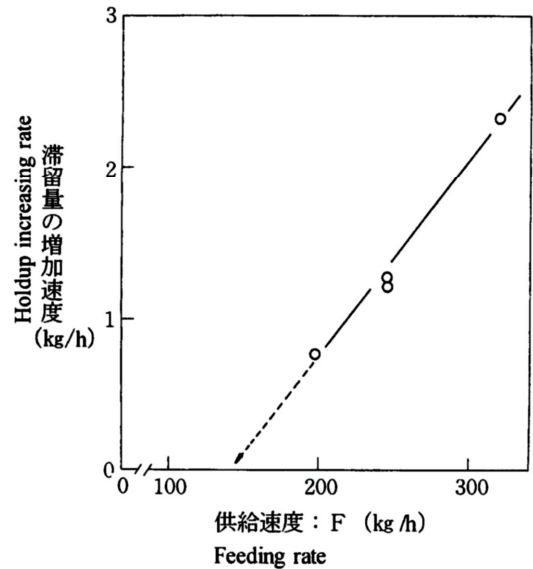
第31図には、滞留量の増加速度と供給速度との関係を示した。前項と同じ方法で最大処理能力を求めた。

第32図には、滞留量が定常値を示す場合の供給速度と滞留量との関係を示した。供給速度と滞留量とは比例関係を示した。従って、粉碎機内の滞留量が定常値を示す場合、平均滞留時間は供給速度によらず一定といえる。同図から粉碎機内の平均滞留時間 t を求め、測定した最大処理能力 F_{max} より、式(10)により最大滞留量 $H_{u,max}$ を求めた。この最大滞留量は、この粉碎機が定常状態をとって操業できる最大許容滞留量といえる。



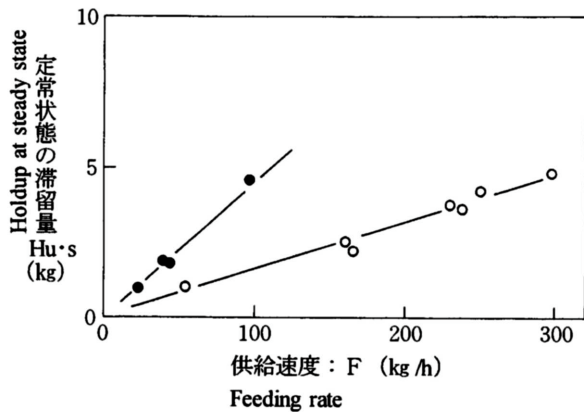
第30図 粉碎機内の滞留量の増加
Fig. 30. Holdup increasing in the crusher.

注：ユニバーサルクラッシャー Universal crusher
カラマツ *Larix leptolepis*
178rad/s
10mm φ 目皿 10mm φ Screen equipped
凡例：●：供給速度=319(kg/h) Feeding rate =319(kg/h)
Legend ○：246(kg/h)
○：197(kg/h)



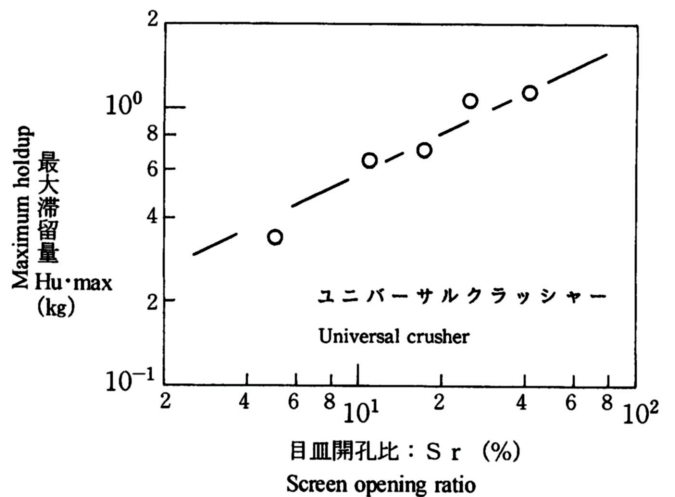
第31図 滞留量の増加速度と供給速度との関係
Fig. 31. Relationships between holdup increasing rate and feeding rate.

注：ユニバーサルクラッシャー Universal crusher
カラマツ *Larix leptolepis*
 ω : 178 (rad/s) ω : 178 (rad/s)
10mm φ 目皿 10mm φ Screen equipped

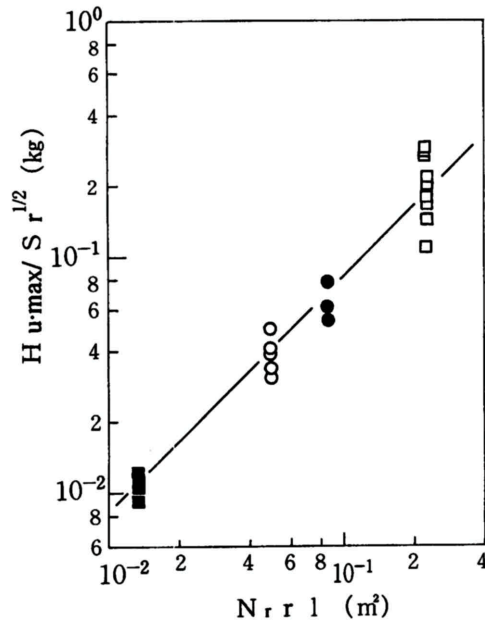


第32図 供給速度と定常状態の滞留量との関係
Fig. 32. Relationships between feed rate and the holdup at steady state.

注：ユニバーサルクラッシャー Universal crusher
Legend カラマツ *Larix leptolepis*
 ω : 178 (rad/s) ω : 178 (rad/s)
○：10mm φ 目皿 ○：10mm φ Screen equipped
●：6mm φ 目皿 ●：6mm φ Screen equipped



第33図 目皿開孔比と最大滞留量との関係
Fig. 33. Relationships between screen opening ratio and maximum holdup.



第34図 $N_r r l$ と $H_u \cdot max / S_r^{1/2}$ との関係

Fig. 34 Relationships between $N_r r l$ and $H_u \cdot max / S_r^{1/2}$.

凡例: :ユニバーサルクラッシャー Universal crusher
 Legend :ウルトラプレックス Ultraplex
 :ノボロータミル Novorotor mill
 :ウイレイミル Willey mill

$$H_{u \cdot max} = F_{max} \times t \tag{10}$$

第33図には、目皿の開孔比 S_r と最大滞留量との関係を示した。最大滞留量は、目皿の開孔比の1/2乗にほぼ比例している。

第34図には、最大滞留量をその目皿開孔比の1/2乗で除した値と、粉碎机ハンマーを回転方向に投影した面積の総和、 $N_r r l$ （ただし、 N_r は回転ハンマーの数、 r はハンマーの先端から粉碎机の回転軸中心までの距離、 l はハンマーの回転方向の幅である）との関係を示した。各形式の粉碎机において次に述べる式(11)式の K の値は、2~3倍程度のばらつきが認められるが、両者はほぼ比例している。従って、粉碎机全体については大略以下の相関が成立する。

$$H_{u \cdot max} = K N_r r l S_r^{\frac{1}{2}} \tag{11}$$

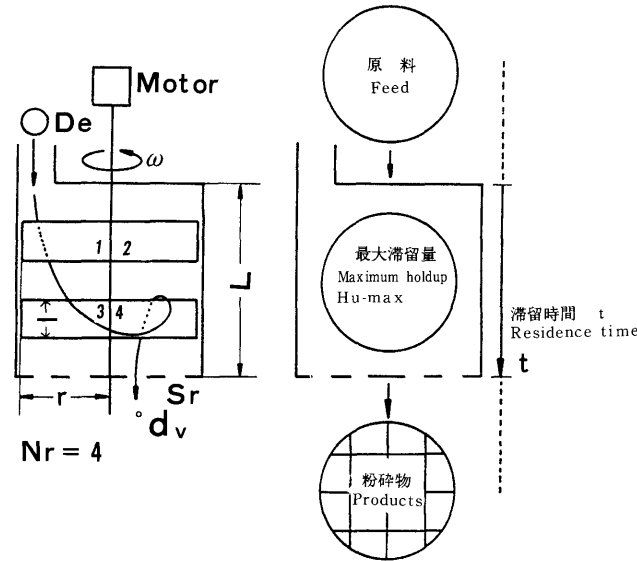
3.1.3 衝撃型粉碎机の最大処理能力の推定⁵⁶⁾

3.1.3.1 はじめに

粉碎工程においてその粉碎机の最大処理能力を推定することは、重要な課題である。粉碎机の操作条件やその大きさからその最大処理能力を推定するための研究はほとんど行なわれていないのが現状である。本項では、目皿付き衝撃型粉碎机の最大処理能力の推定について検討を行う。

第35図に本項で取り上げた目皿付衝撃型粉碎机の模式図を示した。粉碎机の最大処理能力は二つの要素で決定される。それは、粉碎机の最大滞留量 $H_{u \cdot max}$ と粉碎机内の原料の滞留時間 t であり、この二つにより最大処理能力は次式で示される。

$$F_{max} = \frac{H_{u \cdot max}}{t} \tag{9}$$



第35図 目皿付き衝撃型粉砕機のモデル
Fig. 35. A model of screen hammer mill.

最大滞留量はその粉砕機が許容可能な最大の原料量であり、大きな粉砕機は当然その値が大きく、その逆に小さな粉砕機はその値は小さい。すなわち、主に粉砕機の形状によって決定される要素である。一方、滞留時間は粉砕機の形状ばかりでなくその操作条件によって決められる要素である。それは、ハンマーによって与えられる衝撃力の大きさと原料の粉砕性（壊れやすさ）、そして粉砕されるまでに通過する粉砕機内の長さによっている。

筆者は、最大滞留量と粉砕機の形状について前項で報告した。この関係は次式で示された。

$$H_{u \cdot \max} = K N_r r l S_r^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

上式において $H_{u \cdot \max}$ は定常状態で運転可能な最大の滞留量、 K は実験係数、 N_r はハンマーの数、 r はハンマーの先端から粉砕機の回転軸までの距離、 l はハンマーの幅、 S_r は目皿の開孔比である。

筆者はまた、滞留時間についても前項において以下の実験式を示した。

$$t = \frac{C \left[0.693 - \left(\frac{d_v}{D_e} \right)^N \right]}{d_v^{1.3} \omega^2 L^{-\frac{2}{3}}} \quad (8)$$

t は平均滞留時間、 C は係数、 d_v は粉砕物の Rosin-Rammler 粒度分布における 50% 粒径における球相等径、 D_e 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、 ω は粉砕ハンマーの回転角速度、 L は粉砕室の長さである。

以上二つの実験式から、式 (9) より最大処理能力を推定するための実験式は得られるが、本項においては実験係数 C 、 K についてさらに詳しく検討し、木材のみならずほかの粉砕原料にも適用できる、最大処理能力の推定式を提案する。

3.1.3.2 実験方法

実験には、石炭、砂、木炭、ゴムと 6 種の木材を用いた。その密度と粒度を第 5 表に示した。実験には、10 種の目皿付き衝撃型粉砕機を用いた。その仕様は第 6 表に示した。

第5表 粉砕原料の形状と密度
Table 5. Dimensions and densities of the particles used.

種類 Species	De (mm)	n	密度 Density* (g/cm ³)
木炭 Charcoal	9.3 4.3 3.5	1.3 1.0 0.76	0.278
ゴム Rubber	3.3	6.0	0.999
石炭 Coal	3.4	1.19	1.24
砂 Sand	1.06 17.9 15.4	1.9 10.0 10.0	2.61
カラマツ <i>Larix leptolepis</i>	12.5 8.4 6.4 5.2 3.0 2.5 1.45 1.1	3.5 4.2 3.1 3.3 3.4 3.1 3.1 3.5	0.390
シラカンバ <i>Betula platyphylla</i>	12.3	3.5	0.436
シナノキ <i>Tilia japonica</i>	15.8 14.4 8.1	10.0 10.0 5.5	0.305
トドマツ <i>Abies sachalinensis</i>	15.3 9.0 2.82	10.0 3.3 1.44	
ミズナラ <i>Quercus crispula</i>	16.8 13.1 8.5	10.0 10.0 5.0	0.646
トドマツ樹皮 Bark of <i>Abies sachalinensis</i>	28.2 15.5 7.7 4.3	10.0 10.0 5.0 1.0	0.390

* : 乾燥重量基準

* : Based on oven-dry weight.

粉砕は、定量供給機を用いて連続粉砕を行った。粉砕物の排出量は連続的に測定した。粉砕機内滞留量は前章と同様に投入原料と排出量との差から計算によって求めた。粉砕物の粒度分布はJIS規格の標準ふるいを用いて測定した。木材の粒度は球相等径を用いたが、木材以外についてはその形状は木材と比較して球に近いと判断したので、粉砕物の粒度 d_v については Rosin-Rammler 分布上の 50% 重量径、原料の粒度 D_e は原料の Rosin-Rammler 粒度分布における粒度特性数そのものを用いた。

粉砕性の測定はボールミルを用いた。用いたボールミルの仕様を第7表に示した。測定方法は、測定試料をふるいわけ、1~2 mm のフラクションのものを用いた。つぎに、ボールの総体積の 30% に当る見かけ体積の試料をボールミルにいれ一定時間粉砕したのちミルから取り出した。これを 1 mm のふるいを用

第6表 実験に用いた衝撃型粉碎機の仕様
Table 6. Specifications of hammer mills examined.

粉碎機 Mill	動力 Motor (kw)	直径 Diameter (m)	長さ Length (m)	回転数 Rotational speed: ω (rad/sec)	ハンマーの長さ Hammer's length (m)	ハンマーの幅 Hammer's width (m)	ハンマーの数 Number of hammers: Nr	目皿の直径 Open-size of screen (mm)	目皿の開孔比 Opening area ratio of screen (%)	
A	1.5	0.195	0.08	157	0.0825	0.075	2	9.95	38.2	
								5.3	45.0	
								1.4	13.9	
B	3.7	0.210	0.098	149	0.1	0.098	3	7.8	33.4	
								5.8	28.7	
C	0.75	0.099	0.96	120	0.0485	0.096	3	5.9	50.9	
								0.9	18.2	
D	22	0.68	0.79	178	0.34	0.123	52	10.0	41.7	
E	22	0.68	0.79	178	0.34	0.123	52	6.0	38.0	
									25.0	
									17.2	
									10.8	
									5.0	
F	22	0.68	0.68	178	0.34	0.123	39	10.0	41.7	
			0.56							28
			0.45							16
G	22	0.68	0.123	84	0.34	0.123	52	10.0	41.7	
			126							
			210							
H	11	0.3	0.24	148	0.15	0.123	56	10.0	27.1	
			210							
			263							
			316							
I	18.5	0.62	0.11	755	0.31	0.11	26	0.4	6.0	
				520						
				351						
J	0.4	0.14	0.05	104	0.07	0.048	4	2.1	32.5	
								1.05	25.7	
								0.55	22.8	

凡例：A：ロートプレックス（小）， B：ロートプレックス（大）， C：朋来ミル
D：ユニバーサルクラッシャー（ハンマーの数を変えたもの），
E：ユニバーサルクラッシャー（目皿開孔比を変えたもの），
F：ユニバーサルクラッシャー（粉碎機の長さを変えたもの），
G：ユニバーサルクラッシャー（回転数を変えたもの），
H：ノボロターミル， I：ウルトラプレックス， J：ウイレイミル

Legend：A:Roto Plex(small), B:Roto plex(big), C:Horai Mill,
D:Universal Crusher(changed the number of hammers),
E:Universal Crusher(changed the opening area ratio of screen),
F:Universal Crusher(changed the length of the crusher),
G:Universal Crusher(changed the rotational speed).
H:Novorotar mill, I:Ultra plex, J:Willey mill.

第7表 ボールミルの仕様

Table 7. Specifications of ball mill.

直径 Diameter (cm)	長さ Legth (cm)	回転数 Rotational speed (rad/s)	ボール直径 Diameter of ball (cm)	ボール数 Number of ball	ボール密度 Density of ball (g/cc)
22.3	20.0	6.46	3.3	59	2.4

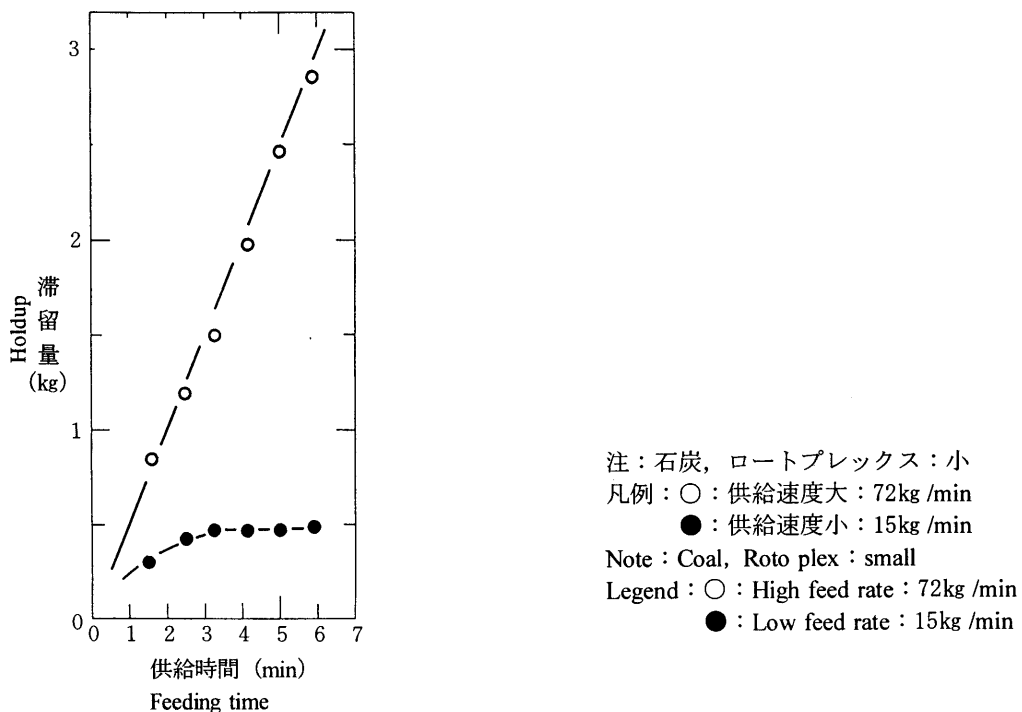
いてふるい、ふるい下の重量をその粉砕時間で除し粉砕速度を求めた。ミル内の試料量を常に一定とするため、ふるい上にふるい下と同じ重量の新しい試料を加え、再びミルに入れた。つぎに、Bondの仕事指数(ボールミル法⁵⁷⁾)を用いて次の粉砕時間を求め、その時間ミルを動かした。この作業を粉砕速度が一定になるまで繰り返した。最後に、ミルに充填した試料重量をこの一定になった粉砕速度で除し、その試料の滞留時間を求め、この値をこの試料の粉砕性を示す指標、粉砕特性時間 τ とした。

3.1.3.3 実験結果と考察

(i) 最大滞留量と原料のかさ密度との関係

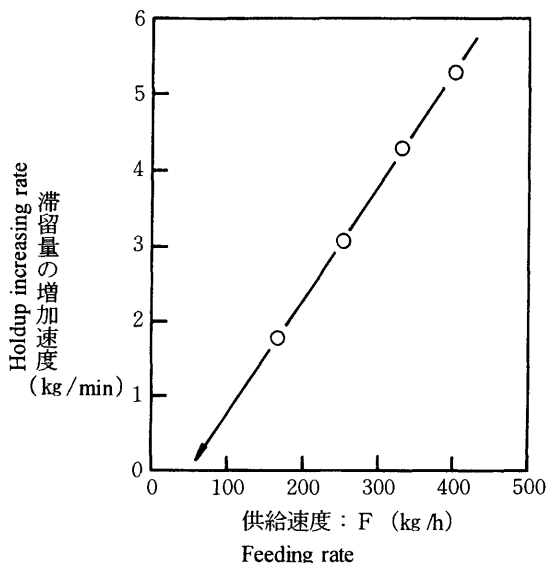
第36図には、ロートプレックス小を用いて石炭を粉砕した場合の粉砕機内の滞留量の変化を示した。木材を粉砕したときと同様に、供給速度の小さい場合滞留量は定常状態を示し、供給速度が大きくなると滞留量は定常状態を示さず、時間とともに増加し続けた。この滞留量の増加速度から前章に述べたと同様の方法で最大処理能力を求めた。この例を第37図に示した。このように、最大処理能力については、木材において求めたと同様な方法で石炭、砂、木炭、ゴムについても測定することができた。

滞留時間測定のを第38図に示した。これについても木材と同様に供給速度が小さい場合、供給速度と定常状態を示す滞留量との間には原点を通る比例関係が見られた。すなわち、粉砕機がその最大処理能力以下で操業している場合、原料の滞留時間は一定といえる。同様の方法で最大処理能力、滞留時

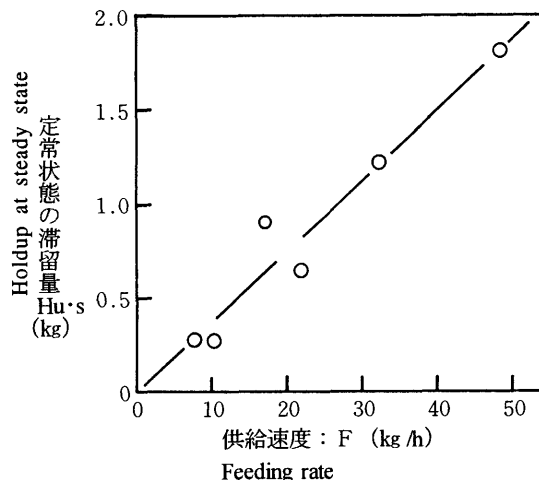


第36図 粉砕機内の滞留量変化

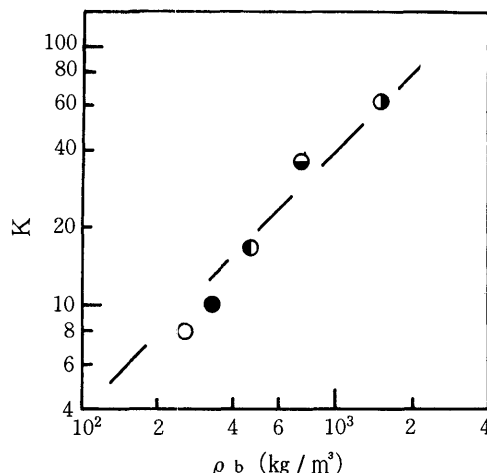
Fig. 36. Holdup changes in the crusher.



第37図 滞留量の増加速度と供給速度との関係
 Fig. 37. Relationships between holdup increasing rate and feeding rate.
 注：石炭，ロートプレックス：小
 Note : Coal, Roto plex : small



第38図 供給速度と定常状態の滞留量と関係
 Fig. 38. Relationships between feed rate and the holdup at steady state.
 注：石炭，ロートプレックス：小
 Note : Coal, Roto plex : small



第39図 ρ_b とKとの関係
 Fig. 39. Relationships between ρ_b and K.
 注：ロートプレックス：小 Coal, Roto plex : small
 Note

- 凡例： ○：カラマツ *Larix leptolepis*
 Legend ●：石炭 Coal
 ●：砂 Sand
 ●：木炭 Charcoal
 ●：ゴム Rubber

間，最大滞留量を砂，木炭，ゴム，カラマツについても測定することができた。

式 (11) に測定値を代入し，係数Kを求めた。最大滞留量は先に述べた様に粉砕機が許容できる原料の最大重量であり，これは粉砕部の代表的な容積によって決定される。従って，原料の密度によりその重量は変わらなければならない。そこで，第39図には，原料のかさ密度 ρ_b と式(11)によって求めた係数Kとの関係を示した。同図より，係数Kは次式で示される。

$$K = 3.95 \times 10^{-2} \rho_b \quad (12)$$

従って、最大滞留量は次式で示されることになる。

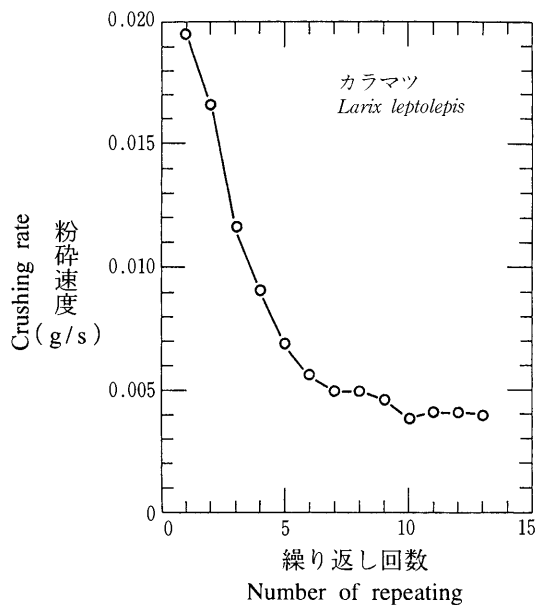
$$H_{u \cdot \max} = 3.95 \times 10^{-2} \rho_b N_r r l S_r^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

(ii) 滞留時間と粉砕性との関係

第40図には、カラマツのボールミル粉砕における粉砕回数と粉砕速度の関係を示した。ほかの試料についても同様であったが、粉砕速度は繰り返し回数10回程度で一定となった。粉砕速度が一定になった段階で、粉砕速度とボールミルに常に一定重量を充填した原料重量から、この原料を粉砕するのに必要な時間を求め、これを粉砕特性時間 τ とした。測定結果を第8表に示した。滞留時間 t を示す式(8)には、原料の粉砕性を示す要素はない。粉砕されやすい原料はその滞留時間は短く、逆に、粉砕されにくい原料の滞留時間は長いはずである。そこで式(8)に基づいて係数 C を求め、 C と粉砕特性時間 τ との関係について検討した。第41図にその関係を示した。同図の関係により係数 C と粉砕特性時間 τ との関係は次式で示される。

$$C = 3.98 \times 10^3 \tau \quad (14)$$

従って、滞留時間 t は次式で示される。



第40図 粉砕繰り返し回数と粉砕速度との関係の一例

Fig.40. Example of the relationship between number of repeating and crushing rate.

第8表 ボールミルによる粉砕特性時間
Table 8. Breakage characteristic time measured by ball mill.

材料 Materials	水分 (%) Moisture content*	粉砕特性時間 (h) Breakage characteristic time
シナノキ <i>Tilia japonica</i>	30	9.51
ミズナラ <i>Quercus crispula</i>	30	11.6
シラカンバ <i>Betula platyphylla</i>	30	4.0
カラマツ <i>Larix leptolepis</i>	30	8.7
カラマツ <i>Larix leptolepis</i>	6.7	5.8
トドマツ <i>Abies sachalinensis</i>	30	17.2
トドマツ樹皮 Bark of <i>Abies sachalinensis</i>	30	0.69
トドマツ樹皮 Bark of <i>Abies sachalinensis</i>	11.3	0.29
エゾマツ樹皮 Bark of <i>Picea jezoensis</i>	30	0.71
木炭 Charcoal	1.8	0.096
石炭 Coal	4.2	0.15
砂 Sand	0	0.34
ゴム Rubber	0	325

* : 湿量基準の水分

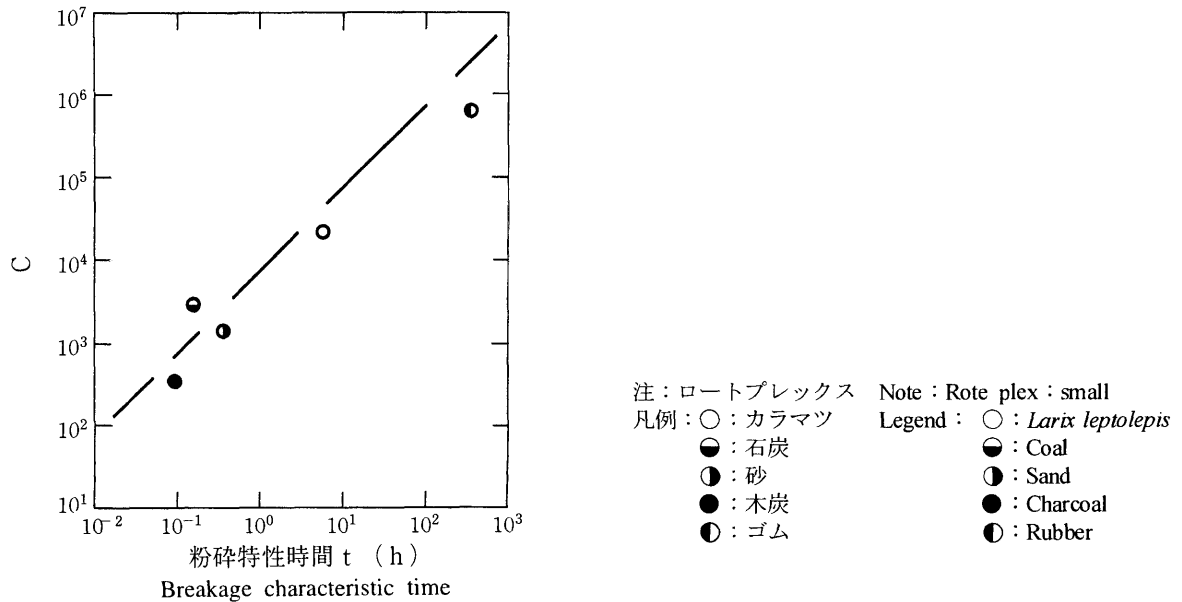
* : Wet base moisture content.

$$t = \frac{3.98 \times 10^3 \tau \left[0.693 - \left(\frac{d_v}{D_e} \right)^N \right]}{d_v^{1.3} \omega^2 L^{-\frac{2}{3}}} \quad (15)$$

上式から、原料の物性も加味した目皿付き衝撃型粉砕機の最大処理能力は次式で示される。

$$F_{\max} = \frac{H_{u \cdot \max}}{t} = \frac{9.92 \times 10^{-6} \rho_b N_r r l S_r^{\frac{1}{2}} d_v^{1.3} \omega^2 L^{-\frac{2}{3}}}{\tau \left[0.693 - \left(\frac{d_v}{D_e} \right)^N \right]} \quad (16)$$

第42図には、最大処理能力の測定値 $F_{\max \cdot n}$ と式(16)によって得られた計算値 $F_{\max \cdot c}$ との関係を示した。石炭、砂、木炭、ゴムとカラマツについては、ロートプレックス小を用い、ほかの粉砕原料はロートプレックス小以外の第6表の粉砕機を用いた。最大処理能力の測定値は計算値の約1.5倍を示しているが、ほぼ式(16)により最大処理能力の推定は可能となったと考えられる。第42図における相関係数は0.947、実線で示した相関からの測定値 $F_{\max \cdot n}$ の隔たりの標準偏差は、0.26であった。ただし、第6表に示したように、本実験式は粉砕機の直径で最大700mm、長さで800mm、ハンマー回転数で755rad/sまでの目皿付き衝撃型粉砕機に適用できる。



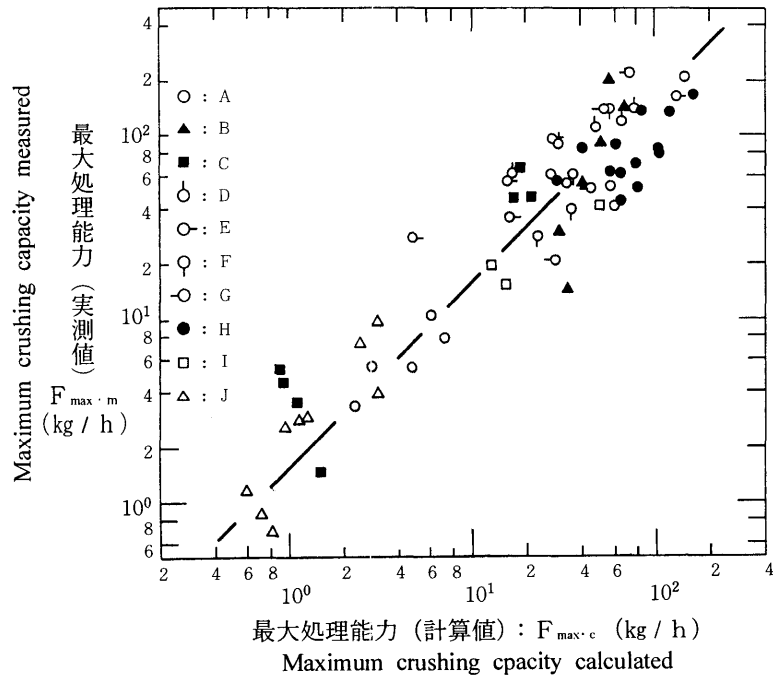
第41図 粉砕特性時間とCとの関係

Fig.41. Relationships between breakage characteristic time and C.

3.2 摩砕型粉砕機の最大処理能力の推定⁵⁸⁾

3.2.1 はじめに

要求される粒度、形状に応じて木材工業においては、目皿付き衝撃型粉砕機以外にも各種の粉砕機が使用されている。その中でも、製紙工場、繊維板工場においては、摩砕型粉砕機が紙やボードの原料を生産するため広く用いられている。これら産業は基本的には装置産業であり、生産性の向上は至上課題である。本項では、処理能力に適合した原動機の出力を選定するため、摩砕型粉砕機についても、前章の最大処理



第42図 最大処理能力の計算値： $F_{max·c}$ と実測値： $F_{max·m}$ との関係

Fig.42. Relationships between maximum crushing capacity measured : $F_{max·m}$ and that calculated numerically : $F_{max·c}$.

- 凡 例：A：ロートプレックス (小) B：ロートプレックス (大) C：朋来ミル
 D：ユニバーサルクラッシャー (ハンマーの数を変えたもの)
 E：ユニバーサルクラッシャー (目皿開孔比を変えたもの)
 F：ユニバーサルクラッシャー (粉碎機の長さを変えたもの)
 G：ユニバーサルクラッシャー (回転数を変えたもの)
 H：ノボロータミル I：ウルトラプレックス J：ウイレイミル

- Legend : A : Roteplex (small) B : Rote plex (big) C : Horai mill
 D : Universal crusher (changed the number of hammers)
 E : Universal crusher (changed the opening area ratio of screen)
 F : Universal crusher (changed the length of the crusher)
 G : Universal crusher (changed the rational speed)
 H : Novorotaor mill I : Ultraplex J : Willey mill

能力を測定する方法が適用できるかの検討を行うとともに、その最大滞留量と滞留時間についても検討し、摩砕型粉碎機の粉碎機構について考察を加えた。

3. 2. 2 供試粉碎機と方法

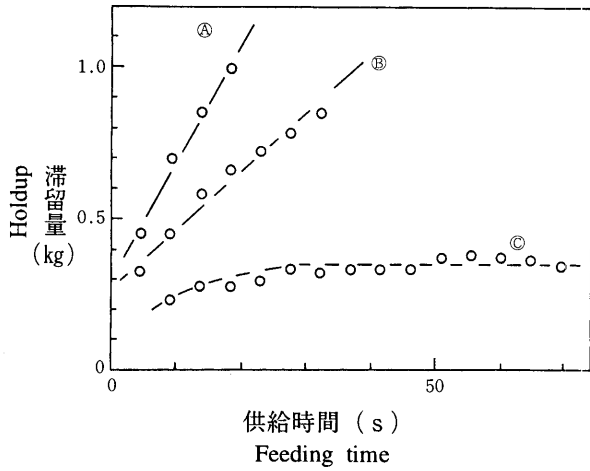
原料木材には、製紙工業における主要な原料の一つであるカラマツを用いた。含水率は35%程度に調整した。

実験に用いた摩砕型粉碎機はいわゆるダブルディスクリファイナーで、その設備動力は150kW、摩砕盤の回転数152rad/s、摩砕盤の直径915mmでほぼ実用規模である。

3. 2. 3 実験結果と考察

3. 2. 3. 1 最大処理能力の測定

第43図は、摩砕盤の間隙を1.2mm一定とし、供給速度をパラメータとして、粉碎機内の滞留量の時間的变化を示したものである。供給速度と滞留量との関係は目皿付き衝撃型粉碎機の場合と同様な変化を示した。すなわち、粉碎機内の滞留量は、原料の平均供給速度が小さい場合、粉碎開始直後定常状態を示す。供給速度が増加するにつれ、定常状態が現われるまでの時間が長くなり、さらに供給速度を増加させると



注：摩砕盤の間隙：1.2mm

Ⓐ：供給速度（大）：467kg/h

Ⓑ：供給速度（中）：349kg/h

Ⓒ：供給速度（小）：164kg/h

Note：Clearance between friction plates：1.2mm

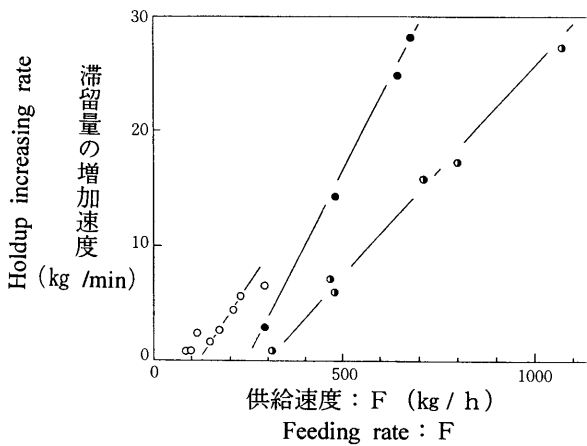
Ⓐ：High feed rate：467kg/h

Ⓑ：Medium feed rate：349kg/h

Ⓒ：Low feed rate：164kg/h

第43図 リファイナーにおける粉砕機内の滞留量の変化

Fig.43. Holdup changes in Refiner.

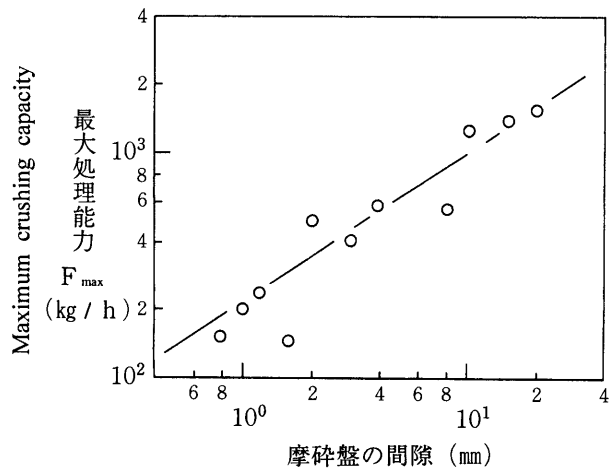


第44図 滞留量の増加速度と供給速度との関係
Fig.44. Relationships between holdup increasing rate and feeding rate.

凡例：摩砕盤の間隙

Legend：Clearance between friction plates

○：1.2 mm, ●：2 mm, ●：4 mm



第45図 最大処理能力と摩砕盤の間隙との関係
Fig.45. Relationships between clearance of friction plates and maximum crushing capacity.

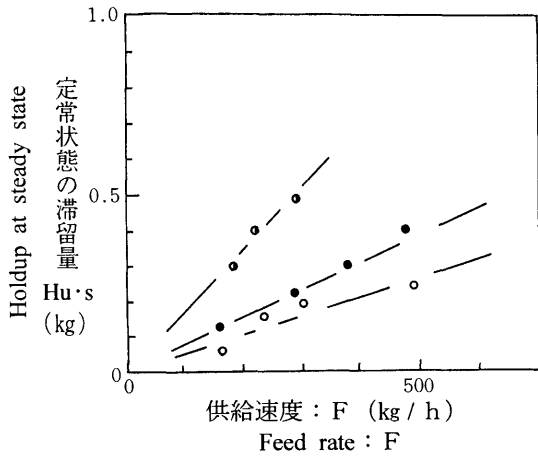
滞留量が時間とともに増加した。

第44図には、粉砕機内の滞留量が定常状態をとらず、時間とともに増加する場合の、供給速度と滞留量の増加速度との関係を摩砕盤の間隙をパラメータとして示した。前章と同様に、同図において、滞留量の増加速度が原料の供給速度に比例して増加する点を直線で結び、滞留量の増加速度がゼロとなる原料供給速度を外挿によって求め、この供給速度を最大処理能力 F_{max} とした。

第45図には、摩砕盤の間隙と最大処理能力 F_{max} との関係を示した。最大処理能力は、摩砕盤の間隙の約 $2/3$ 乗に比例している。

3.2.3.2 最大滞留量、滞留時間の測定と粉砕機構

前章で求めたと同様の方法を用いて、滞留量を測定した。目皿付き衝撃型粉砕機と同様に、摩砕型粉砕機においても最大処理能力以下の供給速度で原料が粉砕機に供給されている場合は、滞留量は定常状態を示す。第46図には、供給速度 F と定常状態をとる滞留量 $H_u \cdot s$ との関係を示した。供給速度と滞留量との間には、目皿付き衝撃型粉砕機の場合と同様に比例関係が認められた。従って、同図より、粉砕機内の滞留量が定常状態をとる場合においては、平均滞留時間 t は一定であるといえる。この関係より、粉砕機内



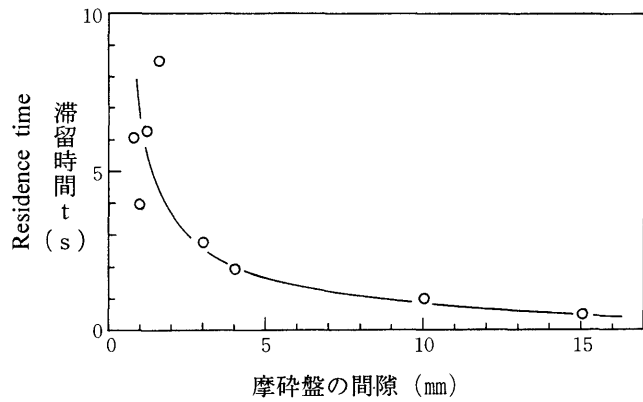
第46図 供給速度と定常状態の滞留量との関係

Fig.46. Relationships between feed rate and the holdup at steady state.

凡例：摩砕盤の間隙

Legend : Clearance between friction plates

● : 1.2mm, ● : 3.0mm, ○ : 4.0mm



第47図 摩砕盤の間隙と滞留時間との関係

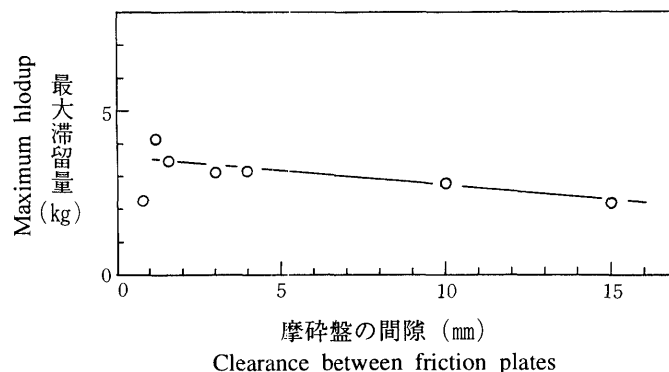
Fig.47. Relationships between clearance between friction plates and residence time.

の滞留時間 t を求め第47図には摩砕盤の間隙 D_c との関係を示した。摩砕盤の間隙が 3 mm 以下になると、滞留時間は急激に増加している。摩砕型粉碎機に投入された原料チップが狭い摩砕盤の間隙を通過するためには、長さが一番小さい方向、すなわちその厚み方向で通過するのが一番可能性が高い。従って、摩砕盤の間隙が 3 mm 以上の場合は、チップの厚みが 3 mm 程度なので粉碎は原料チップを割る形で進行するため、粉碎が繊維に沿って強度の小さい部分に亀裂が入り進行すると考えられるためその速度は速く、従って滞留時間は短い。しかし、摩砕盤の間隙が 3 mm 以下になると、チップが割れるだけでは摩砕盤の間隙を通過できないため、通過には、強度の大きい部分、小さい部分が均等に粉碎されなければならないため、その粉碎速度は小さく、従って、滞留時間が大きくなると考えられる。

前項で求めたと同様の方法を用いて、最大滞留量を測定した。すなわち、測定した最大処理能力 F_{max} と、第44図から求めた粉碎機内の平均滞留時間 t より、式(10)により最大滞留量 $H_{u \cdot max}$ を求めた。

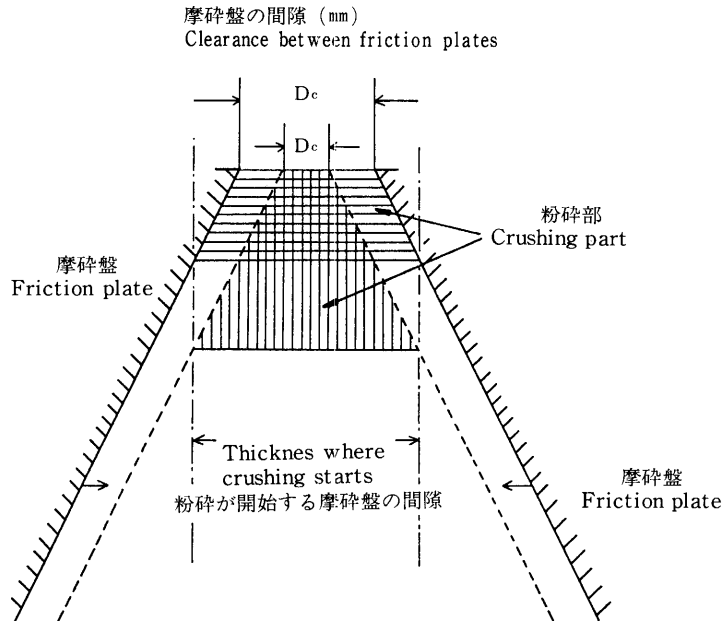
$$H_{u \cdot max} = F_{max} \times t \quad (10)$$

第48図に、求めた最大滞留量と摩砕盤間隙との関係を示した。粉碎機内の最大滞留量は同図によると摩砕盤の間隙の減少とともにわずかながら増加する傾向を示しているが、滞留時間のような極端な増加は見られない。以上の結果から摩砕型粉碎機内の粉碎機構について以下のようなことが推察できる。摩砕型



第48図 摩砕盤の間隙と最大滞留量の関係

Fig.48. Relationships between the clearance of friction plates and maximum holdup.



第49図 摩擦盤の間隙と粉砕部の変化の関係

Fig.49. Relationships between crushing part changes and the clearance of friction plates.

粉砕機において摩擦盤は第49図に示したように、互いに平行ではなく、本実験で用いた摩擦型粉砕機では約2度の傾きを持っている。摩擦盤で囲まれた部分が粉砕室であるが、この全てで粉砕を行うのではなく、粉砕は摩擦盤の先端部の粉砕部で行われることがよく知られている（例えば文献⁵⁹⁾）。第48図に示したように、最大滞留量が摩擦盤間隙によらずほぼ一定ということは、この粉砕部の容積が摩擦盤間隙によらずほぼ一定であることを示唆している。このことは、第49図に示したように、粉砕部は、摩擦盤の間隙が一定以下の部分（斜線の部分）であり、間隙を広くすると粉砕部は粉砕室の円周方向へ移動し、間隙を狭くすると粉砕部は粉砕室の中心方向へ移動するが、結局その容積は保存されていると考えられる。

3.3. 切削型粉砕機の最大処理能力の推定

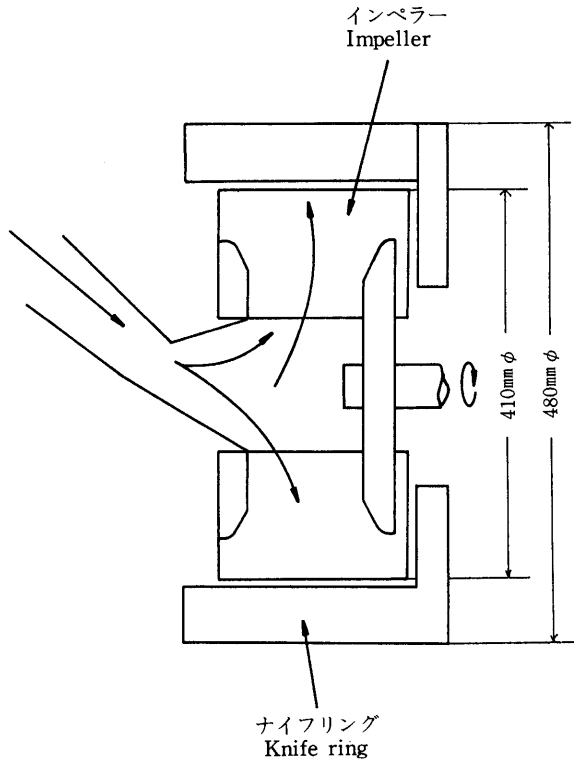
3.3.1 はじめに

本項においては、パーテクルボード工場において用いられる切削型粉砕機をとりあげ、前章の目皿付き衝撃型粉砕機において測定したと同様の方法で、その最大処理能力について検討した。取り上げた切削型粉砕機はパールマンチップパーで、その粉砕部を第50図、第51図に示した。同図に示したように、原料チップは、中心部に投入されインペラーと呼ばれる羽根により外周部へ飛ばされ、インペラーと逆方向に回転する多数の刃物を有するナイフリングにより、チップの厚さ方向にスライスされる。その厚さは、ナイフリングに装着した刃物の刃の出し方、(刃出しという)によって制御する仕組みである。

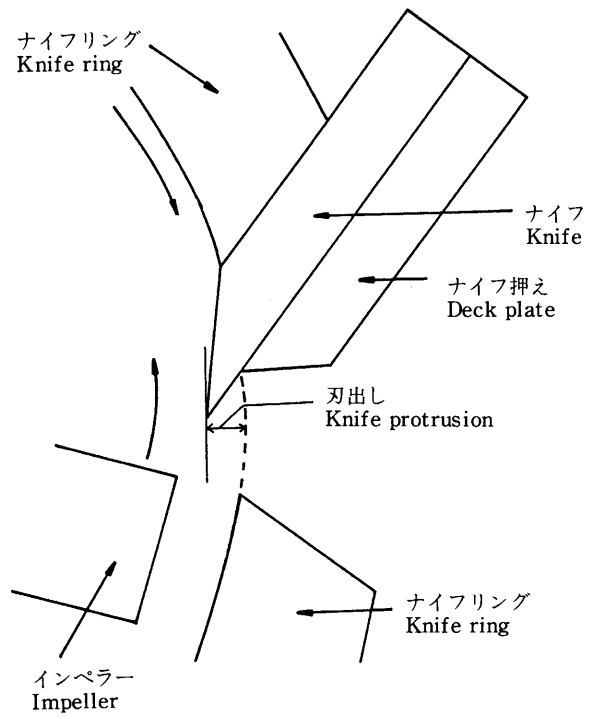
3.3.2 実験方法と結果

インペラーの回転数は152rad/s、ナイフリングの回転数を99rad/s一定とし、刃出しを0.25、1.0mmの2条件設定した。

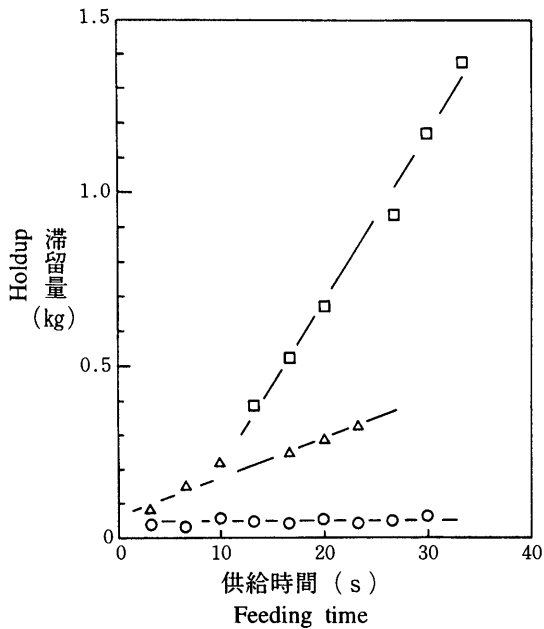
第52図には、用いた切削型粉砕機における供給速度をパラメータとした時の粉砕時間と滞留量の変化を示した。切削型粉砕機においても、供給速度の変化による滞留量の挙動は、目皿付き衝撃型粉砕機、摩擦型粉砕機と同様であった。



第50図 パールマンチッパーの粉碎部
Fig.50. Schematic diagram of the inside of Pallmann Chipper.



第51図 パールマンチッパーの切削部
Fig.51. Schematic diagram of the knife setting of Pallmann Chipper.



第52図 パールマンチッパーにおける滞留量の変化

Fig.52. Holdup changes in Pallmann Chipper.

注：刃出し：1.0mm

凡例：□：供給速度（大）：504kg / h

△：供給速度（中）：441kg / h

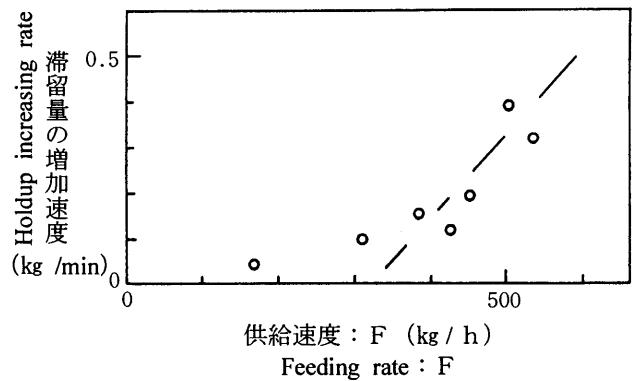
○：供給速度（小）：244kg / h

Note : Knife protrusion : 1.0mm

Legend : □ : High feed rate : 504kg / h

△ : Midium feed rate : 441kg / h

○ : Low feed rate : 244kg / h

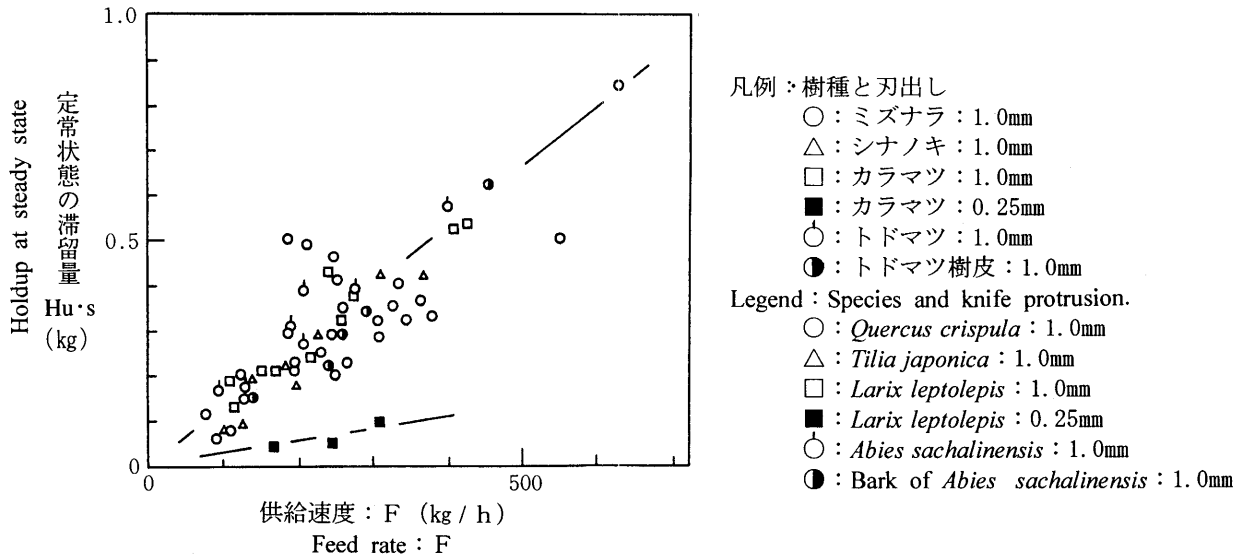


第53図 パールマンチッパーにおける滞留量の増加速度と供給速度との関係

Fig.53. Relationships between holdup increasing rate and feeding rate in Pallmann Chipper.

注：刃出し：0.25mm

Note : Knife protrusion : 0.25mm



第54図 パールマンチッパーにおける供給速度と定常状態の滞留量との関係

Fig. 54. Relationships between feed rate and the holdup at steady state in Pallmann Chipper.

第53図には、滞留量が定常状態を示さず、時間とともに増加する場合の供給速度と滞留量の増加速度との関係を示した。切削型粉碎機においても、供給速度と滞留量増加速度との関係は、目皿付き衝撃型粉碎機、摩砕型粉碎機と同様であった。この関係から前章と同様な方法を用いて最大処理能力を測定することができた。

前章と同様に切削型粉碎機においても、供給速度が最大処理能力以下の場合、滞留量は定常状態を示す。第54図には、供給速度 F と定常状態の滞留量 $H_u \cdot s$ との関係を示した。供給速度と定常状態の滞留量の間には比例関係があり、最大処理能力以下の供給速度で粉碎機が操業している場合粉碎機の滞留時間はほかの粉碎機と同様に一定であるといえる。

前項で求めたと同様の方法を用いて、最大滞留量を測定した。すなわち、測定した最大処理能力 F_{\max} と、第54図から求めた粉碎機内の平均滞留時間 t より、前項において示した式(10)により最大滞留量 $H_{u \cdot \max}$ を求めた。

$$H_{u \cdot \max} = F_{\max} \times t \quad (10)$$

用いたパールマンチッパーの刃出し0.25mmの条件における最大処理能力は321kg/h、滞留時間は1.02秒、最大滞留量は91gとなった。

第4章 各種粉碎機の適正電動機出力の推定

4.1 衝撃型粉碎機の適正電動機出力の推定⁶⁰⁾

4.1.1 はじめに

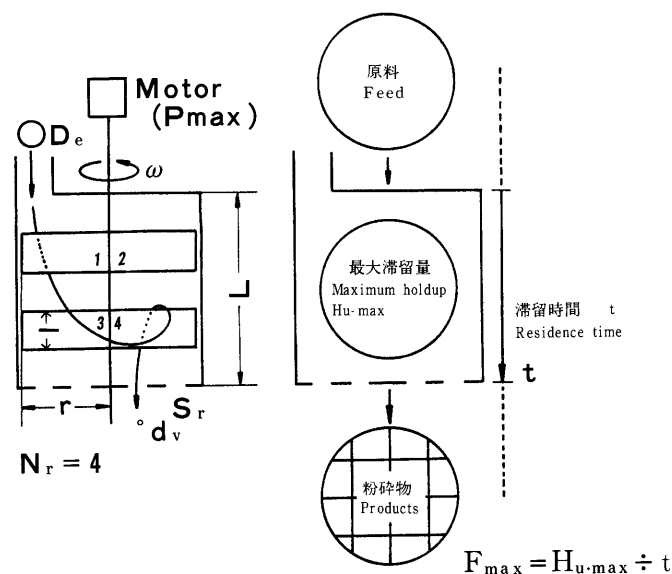
第55図に、本項で取り上げた目皿付衝撃型粉碎機の模式図を示した。粉碎機に設備した原動機の出力kWが、粉碎機の最大処理能力より大きい場合、その最大処理能力 F_{max} は、粉碎機の最大滞留量 $H_{u\cdot max}$ と原料の滞留時間 t の二つの要素によって決定される。しかし、粉碎機が十分な処理能力を有していても、原動機出力がその最大処理能力に較べて小さい場合、その処理能力は原動機の数値によって決定される。従って、原動機の数値と粉碎機の最大処理能力は一致すること望ましい。

前章において、筆者は最大滞留量、滞留時間、最大処理能力を求めるための実験式(13)、(15)、(16)を提示し、与えられた粉碎機の仕様とその操作条件および粉碎する原料の粉碎特性時間を測定することでその最大処理能力をほぼ推定することが可能となった。しかし、設備すべき原動機の数値についてはなにも分かってはいない。粉碎における単位の重量の粉碎原料を粉碎するための動力 E (kWh/t)は、原料の物性のみならず、使用する粉碎機の数値や操作条件によって異なる。従来、この粉碎動力と使用する粉碎機の数値や操作条件の関係についての検討はほとんど行なわれていない。本項の目的は、この関係を検討することで、粉碎に必要な動力を推定し、その粉碎機の最大処理能力に適合した原動機の数値 P_{max} (kW)をきめる方法を提案することである。

粉碎における動力の消費量 E (kWh/t)と、粉碎機への原料の供給速度 F (t/h)、設備すべき原動機の数値 P (kW)の間には次式の関係がある。

$$P = F \times E \quad (17)$$

粉碎機をその最大処理能力 F_{max} で操業させるためには、原動機の数値は次式で示される設備動力 P_{max} でなければならない。



第55図 目皿付き衝撃型粉碎機のモデル
Fig.55. A Model of screen hammer mill.

$$P_{\max} = F_{\max} \times E \quad (18)$$

従って、粉砕における動力の消費量E (kWh/t) と、原料の物性、使用する粉砕機の大きさや操作条件との関係が分かれば設備すべき原動機の出力を決めることができる。本項ではこれらの関係について検討をおこなった。

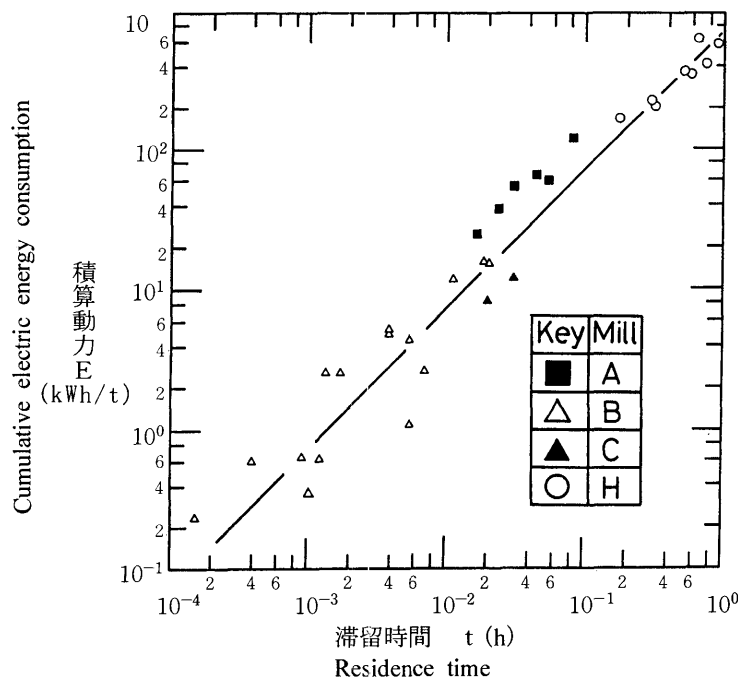
4.1.2 実験方法

粉砕における動力の消費量E (kWh/t) については回分方式の粉砕において、粉砕原料を粉砕機が停止しない程度の量を粉砕機に一度に投入し測定した。その積算動力 (kWh) は瞬時動力を積算して求めた。定常状態での瞬時動力 (kW) の測定は、定量供給機により原料を粉砕機に一定速度で定量供給、連続粉砕し求めた。その瞬時動力 (kW) は定常状態の動力から求めた。実験に用いた粉砕機は、第9表に示した。

4.1.3 実験結果と考察

第56図には、式(15)から求めた滞留時間と、回分粉砕における乾物原料1 t当たりの積算動力E (kWh/t) との関係を示した。粉砕特性時間 τ は、第3章3.1.3項と同様の方法で求めた。第56図における相関係数は0.983、実線で示した相関からの積算動力E (kWh/t) 測定値の隔たりの標準偏差は、0.26であった。同図の関係より乾物原料1 t当たりの積算動力E (kWh/t) は、滞留時間tとの間に次式の関係が見い出された。

$$E = 700 \times t \quad (19)$$



第56図 滞留時間 t と積算力 E との関係

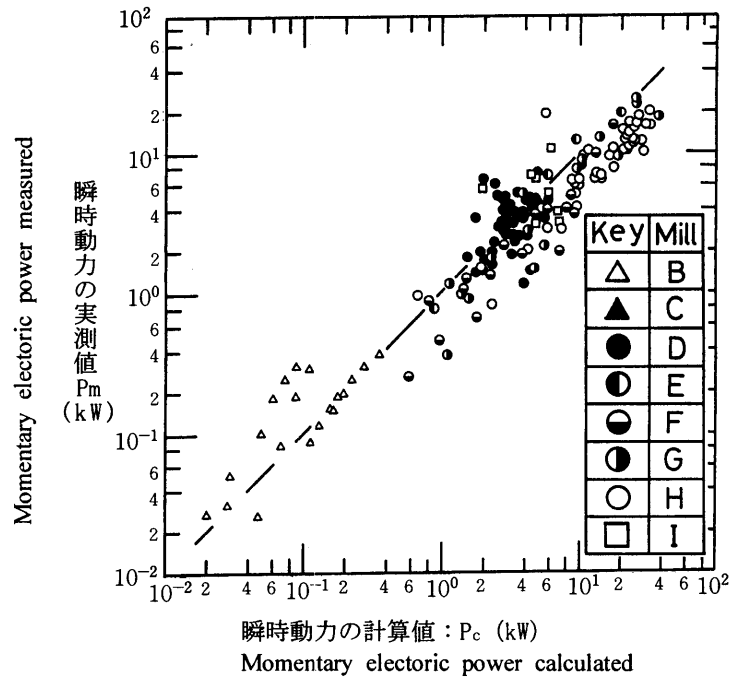
Fig.56. Relationships between cumulative electric energy consumption per dry E and residence time through mill t.

凡 例：A：ウイレイミル，B：ロートプレックス(小)，C：ロートプレックス(大)，
 H：ユニバーサルクラッシャー（ハンマーの数，目皿開孔比，回転数を変えたもの）
 Legend：A：Willey mill, B:Rote plex (mall), C:Rote plex (big),
 H：Universal crusher (changed the number of hammers, the opening area ratio of screen and the rotational speed).

第9表 実験に用いた衝撃型粉碎機の仕様
Table 9. Specifications of hammer mills examined.

粉碎機 Mill	動力 Motor (kW)	直径 Diameter (m)	長さ Length : L (m)	回転数 Rotational speed : ω (rad / s)	ハンマーの長さ Distance : r (m)	ハンマーの幅 Width : l (m)	ハンマーの数 Number of hammers : Nr	目皿の直径 Open-size of screen (mm)	目皿の開孔比 Opening area ratio of screen : Sr (%)
A	0.4	0.14	0.05	104	0.07	0.048	4	2.1 1.05	32.5 25.7
B	1.5	0.195	0.08	157	0.0825	0.075	2	0.55 9.95	22.8 38.2
C	3.7	0.210	0.098	149	0.1	0.098	3	5.3 1.4	45.0 13.9
D	11	0.3	0.24	148 210 263 316	0.15	0.123	56	7.8 5.8 10.0	33.4 28.7 27.1
E	22	0.68	0.45	178	0.34	0.123	39	10.0	41.7
F	22	0.68	0.56	178	0.34	0.123	28	10.0 20.0	41.7 42.6
G	22	0.68	0.68	178	0.34	0.123	39	50.0	42.5
H	22	0.68	0.79	178	0.34	0.123	52	10.0 10.0	41.7 41.7
							38 26 14 8		
I	18.5	0.62	0.11	755 520 351	0.31	0.11	26	6.0 10.0	38.0 25.0 17.2 10.8 5.0 41.7

凡例： A : ウィレイミル B : ロートブレックス (小) Legend : A : Willey mill B : Roto plex (small)
 C : ロートブレックス (大) D : ノボロータミル C : Roto plex (big) D : Novortar mill
 E : ユニバーサルクラッシュヤー (粉碎機の長さを変えたもの) E : Universal crusher (changed the length of the crusher)
 F : ユニバーサルクラッシュヤー (粉碎機の長さを変えたもの) F : Universal crusher (changed the length of the crusher)
 G : ユニバーサルクラッシュヤー (粉碎機の長さを変えたもの) G : Universal crusher (changed the length of the crusher)
 H : ユニバーサルクラッシュヤー (ハンマーの数、回転数を変えたもの) H : Universal crusher (changed the number of hammers, the opening area ratio of screen and the rotational speed)
 I : ウルトラブレックス I : Ultra plex



第57図 瞬時動力の計算値 P_c と実測値 P_m との関係

Fig.57. Relationship between momentary electric power calculated P_c and measured P_m .

- 凡 例：B：ロートプレックス(小), C：ロートプレックス(大), D：ノボロータミル,
 E：ユニバーサルクラッシャー (粉碎機の長さを変えたもの),
 F：ユニバーサルクラッシャー (粉碎機の長さを変えたもの),
 G：ユニバーサルクラッシャー (粉碎機の長さを変えたもの),
 H：ユニバーサルクラッシャー (ハンマーの数, 目皿開孔比, 回転数を変えたもの),
 I：ウルトラプレックス

- Legend：B：Roto plex (small), C：Roto plex (big), D：Novorotar mill,
 E：Universal crusher (changed the length of the crusher),
 F：Universal crusher (changed the length of the crusher),
 G：Universal crusher (changed the length of the crusher),
 H：Universal crusher (changed the number of hammers, the opening area ratio of screen and the rotational speed),
 I：Ultraplex.

式から定常状態に粉碎における瞬時動力は次式で示される。

$$P = F \times 700t \quad (20)$$

第57図には、測定した定常状態における瞬時動力 P_m と式(20)によって得られた瞬時動力 P_c との関係を示した。瞬時動力 P_c は、測定した瞬時動力 P_m よりも若干大きい値を示している。この理由は、回分粉碎における動力の消費は、連続定常粉碎よりも急激に原料を投入することと、粉碎が終了しても急激には動力はゼロにならないため、連続粉碎に比較してその消費動力が大きくなると思われる。しかしながら、同図より測定値は計算値とほぼ等しいといえよう。第57図における相関係数は0.961、実線で示した相関からの測定値 F_m の隔たりの標準偏差は、0.24であった。ただし、第6表に示した様に、本実験式は粉碎機の直径で最大700mm、長さで800mm、ハンマー回転数で755rad/sまでの目皿付き衝撃型粉碎機に適用できる。粉碎機の最大処理能力に適合した原動機の瞬時動力は式(20)において、供給速度 F に最大処理能力 F_{max} (この場合は(t/h)とする)を代入することによって得られる。

4.1.4 目皿径と粉碎物の粒度について⁶¹⁾

4.1.4.1 はじめに

前項までに述べたに目皿付き衝撃型粉碎機の設計を行う場合、希望する粉碎物の粒度と使用する目皿の大きさの関係を知らなければならない。

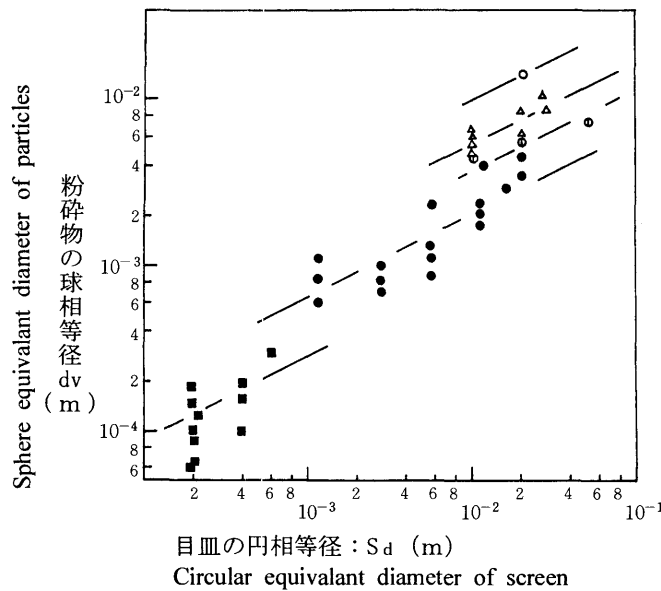
4.1.4.2 実験方法

実験には第2章2.1項において用いた木質4種、樹皮1種を用いた。用いた目皿付き衝撃型粉碎機は第3章3.1.1項において用いたユニバーサルクラッシャー、ノボロータミル、ウルトラプレックスの3種類である。

粉碎機の操作条件は、次の如くである。ノボロータミルについては回転数を150rad/s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、40×10mm、30×10mmと5mm、10mm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バーサルクラッシャーについては、回転数を52、126、178rad/sの3条件を設定した。目皿は50、20、10mmの円形目皿および、ノボローターミルと同じ形状で、30×10mm、20×10mmおよび目開き10、5、2.5、1mm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367、524、744rad/sの3条件とし、用いる目皿は円形で0.2、0.4、0.6mmの3種類とした。

4.1.4.3 実験結果と考察

第58図には、木質について、用いた目皿の円相等径と S_d (m)と、粉碎物の球相等径 d_v (m)との関係を示した。同図より、粉碎物の粒度は円相等径 S_d の約1/2乗に比例していることが分かる。第59図には、目皿の円相等径を 10^{-2} mとした場合の第58図における球相等径 d_v とハンマーの遠心力加速度 $r\omega^2$ (m/s²)との関係を示した。従って、粉碎物の粒度 d_v は第58図、第59図の関係より次式で求められる。



第58図 目皿の円相等径 S_d と粉碎物の球相等径 d_v との関係

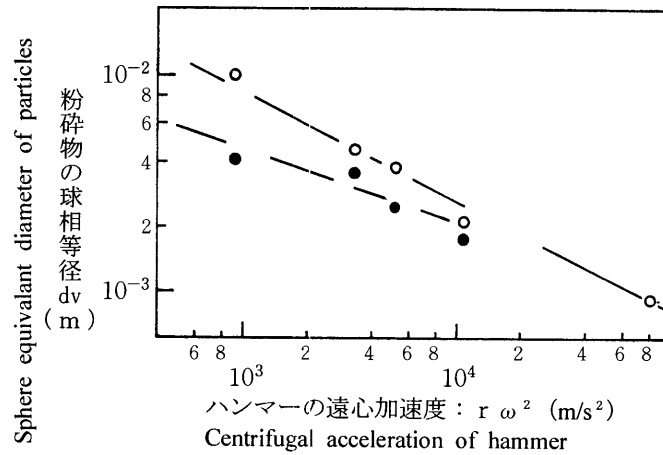
Fig.58. Relationships between circular equivalent diameter of screen S_d and sphere equivalent diameter of particles d_v .

凡 例：ハンマーの遠心加速度： $r\omega^2$

Legend：Centrifugal acceleration of hammer： $r\omega^2$

○： 9.3×10^2 (m/s²), △： 3.4×10^3 (m/s²), ⊙： 5.4×10^3 (m/s²)

●： 1.1×10^4 (m/s²), ■： 6.6×10^4 (m/s²)



第59図 ハンマーの遠心加速度と粉砕物の球相等径との関係
 Fig.59. Relationships between centrifugal acceleration of hammer $r\omega^2$ and sphere equivalent diameter of particles d_v .

注： $S_d=0.01\text{m}$, O : wood, ● : Bark.
 Note

$$d_v = R S_d^{\frac{1}{2}} (r\omega^2)^n \quad (21)$$

ただし、係数 R , n はこの順で木質 2.64, $-1/2$, トドマツ樹皮 0.457, $-1/3$ であった。

4.2 摩砕型粉砕機における適正原動機出力の選定⁵⁸⁾

製紙工場、繊維板工場においては、摩砕型粉砕機が紙やボードの原料を生産するため広く用いられている。これら産業は基本的には装置産業であり、生産性の向上は至上課題である。生産性の向上のため摩砕型粉砕機の動力は世界的に大きくなる傾向であり、製紙工場、繊維板工場においては最大の課題は動力費の低減である。第2章2.1項において、目皿付き衝撃型粉砕機における滞留量の増加速度より粉砕機の最大処理能力を求める方法を提案した。粉砕機の設備すべき原動機の出力は前項に述べたごとくこの最大処理能力に適合したものでなければならない。過大な原動機出力は、その設備費の点で、過小の場合は生産性の点で、どちらの場合もコスト増の原因となる。本項では、処理能力に適合した原動機の出力についての検討を行う。

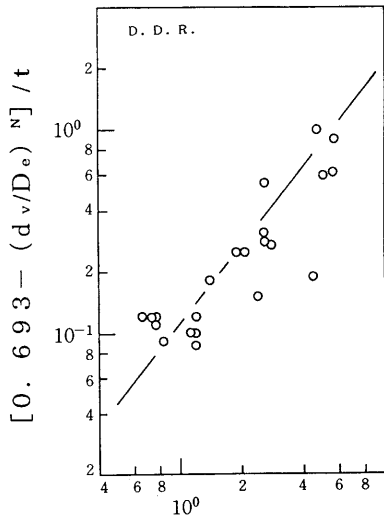
第3章3.1.1項に示したように、供給物および粉砕物の粒度が Rosin-Rammler 粒度分布に従うとし、供給物の 36.8%重量径における球相等径を D_e 、分布定数を N 、粉砕物の 50%重量径における球相等径を d_v で表すとすれば、粉砕速度式 (d_v の t による変化) は次式で与えられる。

$$\frac{0.693 - \left(\frac{d_v}{D_e}\right)^N}{t} = K^* d_v^n \quad (5)$$

滞留量が定常状態を示す場合において、その滞留時間が上式の粉砕時間 t であるとして、式 (5) により摩砕型粉砕機式についても定数 n や K^* を求めた。

第60図には式 (5) の関係を摩砕型粉砕機について示した。同図によると摩砕型粉砕機における定数 n は、目皿付き衝撃型粉砕機と同じ 1.3、定数 K^* は 1.1×10^{-1} であった (ただし、 t の単位はこの場合秒である)。

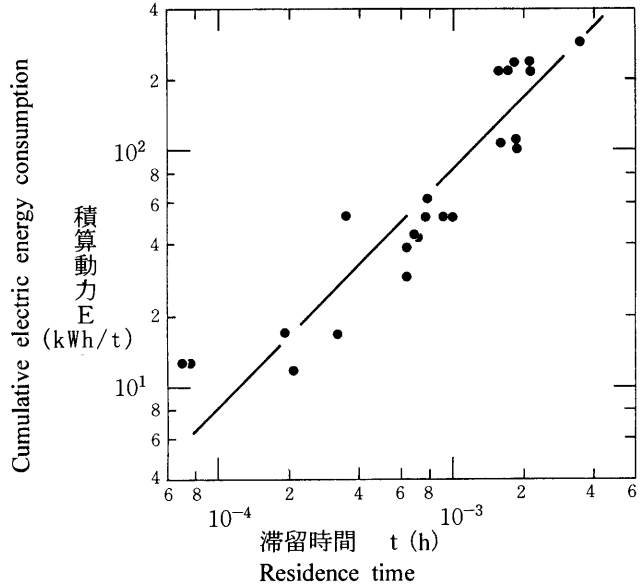
前項において、目皿付き衝撃型粉砕機の粉砕動力は原料の滞留時間に比例することを示した。第61図



粉碎物の球相等径： d_v (mm)
Sphere equivalent diameter of particles

第60図 リファイナーに置ける粉碎物の球相等径と $[0.693 - (d_v/D_e)^n] / t$ との関係

Fig.60.Relationships between sphere equivalent diameter of particles crushed by Refiner and $[0.693 - (d_v/D_e)^n] / t$.



第61図 滞留時間 t と積算動力 E との関係

Fig.61.Relationships between cumulative electric energy consumption per dry weight E and residence time through mill t .

注：リファイナー，シナノキ
Note : Refiner, *Tilia japonica*.

には、摩砕型粉碎機における滞留時間と粉碎動力との関係を示した。第61図における相関係数は0.933、実線で示した相関からの積算動力 E (kWh/t) 測定値の隔たりの標準偏差は、0.17であった。同図より摩砕型粉碎機においても、粉碎動力は原料の滞留時間に比例していることが分かる。この関係は次式で示される。

$$E = 8.4 \times 10^4 \times t \quad (22)$$

ただし、 t の単位はこの場合時間である。

以上の結果から、摩砕型粉碎機における適正原動機出力を選定する過程は以下のようになる。

- ① 最大処理能力は第45図から求める。
- ② 原料粒度と希望する粒度を用いて式(5)により滞留時間 t を求める。
- ③ 式(22)を用いて、②で求めた滞留時間から粉碎動力を求める。
- ④ ①で求めた最大処理能力と③で求めた粉碎動力から前項における式(18)を用いて適正原動機出力を求める。

以下にチップを0.3mm程度に粉碎する計算例を示す。

摩砕盤の間隙を0.8mmとする。処理能力は第45図に示したように、間隙が0.8mmの場合約200kg/hである。粉碎動力は下記に示した前述の式(5)(22)から求めることができる。

$$\frac{0.693 - \left(\frac{d_v}{D_e}\right)^n}{t} = K^* d_v^n \quad (5)$$

$$E = 8.4 \times 10^4 \times t \quad (22)$$

定数 n は、目皿付き衝撃型粉碎機と同じ1.3、定数 K^* は 1.1×10^{-1} である。式(5)において、 D_e に原料チップの大きさ9.0mmを、 N に3.3、 d_v に0.3mmを代入すると、滞留時間 t は30.1秒となる。滞留時

間を時間に換算し式 (22) に代入すると、粉砕動力 E は 703kWh/t となった。適正原動機出力は、処理能力は 0.2t/h なので前項における式 (18) を用いて約 140kW となった。

4.3 切削型粉砕機の適正原動機出力の推定⁵²⁾

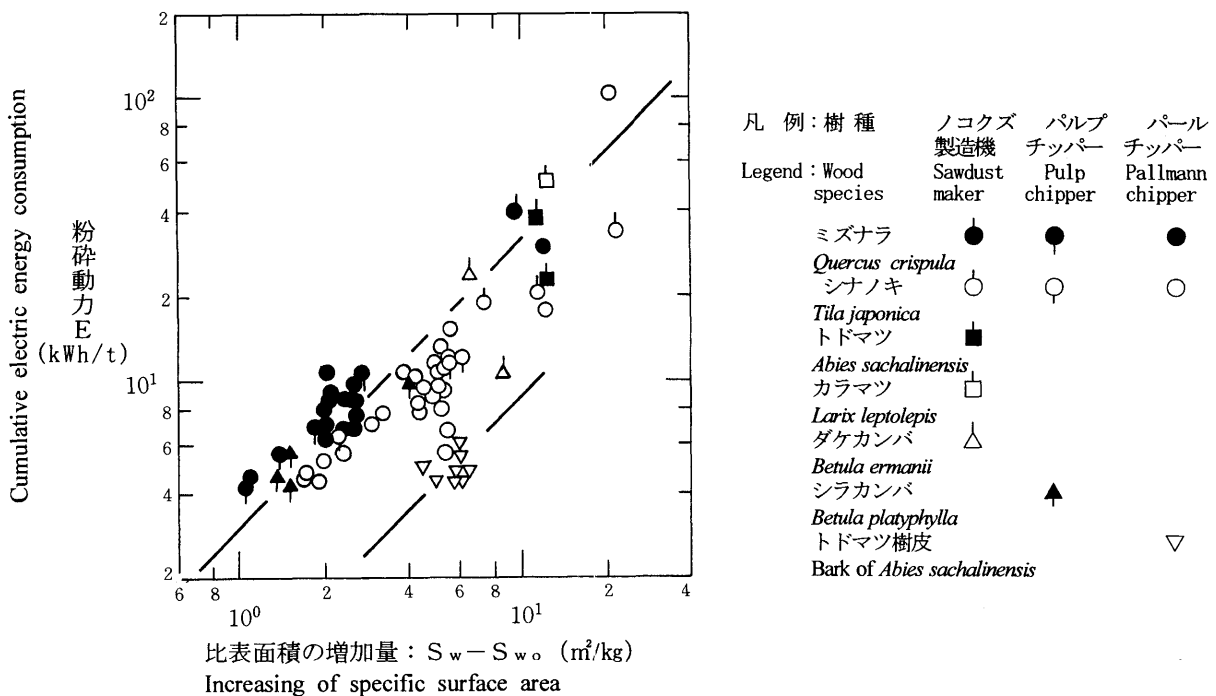
粉砕動力は粉砕物の表面積が測定できれば、それによって表示することが一番よいとされている (例えば文献⁶²⁾)。パールマンによる粉砕物は衝撃型粉砕機による粉砕物と比較すると、“髭” などを持っていない比較的簡単な形状であるので、その表面積を長方形近似で求めても、実測値とそれほどかけはなれていないと考えられる。そこで、パールマンによる粉砕物については第 2 章 2.2 項の第 16 図～第 19 図より粉砕物の表面積を求めた。粉砕動力は、Rittinger の表示式と呼ばれる次式

$$E = K^{**} (S_w - S_{w_0}) \quad (23)$$

に従って、第 62 図に粉砕物の単位重量当たりの比表面積の増加量と粉砕動力との関係を示した。同図には、切削型粉砕機であるノコズ製造機とパルプチッパーについてもプロットした。ただしノコズの表面積は球形近似で、チップの表面積はその形状を測定し長方形近似により求めた。第 62 図における木質の相関係数は 0.88、実線で示した相関からの積算動力 E (kWh/t) 測定値の隔たりの標準偏差は、0.17 であった。トドマツ樹皮の相関係数は 0.115、実線で示した相関からの積算動力 E (kWh/t) 測定値の隔たりの標準偏差は、0.079 であった。同図から、切削型粉砕機については本実験の範囲では、粉砕機の形状や操作条件によらず木質では K^{**} は 3.0、トドマツ樹皮では 0.85 となった。

従って、切削型粉砕機における適正原動機出力は、希望する粒度から第 62 図よりその粉砕に必要な動力を求め、目皿付き衝撃型粉砕機や摩砕型砕機と同じ方法でその最大処理能力 F_{max} を測定し、前項における式 (18) からその適正原動機出力 P_{max} を求めれば良いことになる。

計算例を以下に示した。



第62図 切削型粉砕機における比表面積の増加量と粉砕動力の関係
Fig.62. Relationships between the increasing of specific surface area and cumulative electric energy consumption in blade-type crusher.

カラマツ小径木（直径0.15m, 長さ1.8m）から直接1 mm程度のノコクズをノコクズ製造機で作る場合について述べる。切削型粉砕機の粉砕動力は、前述したように Rittinger の表示式と呼ばれる次式

$$E = K^{**} (S_w - S_{w0}) \quad (23)$$

によって示される。K** は木質の場合 3 であった。この式に原料小径木の比表面積の計算値 0.0617m²/kg とノコクズの比表面積の計算値 15m²/kg を代入すると、粉砕動力は 44.9kWh/t となる。通常ノコクズ製造機の処理能力は 2 m³/h, 重量にして 0.9t/h 程度なので、前項における式 (18) からその適正原動機出力は 40.4kW となる。

第5章 総合考察

5.1 最大処理能力算定方法の確立⁵¹⁾

5.1.1 最大処理能力算定方法の確立

機械や装置によって製品を生産する場合、まず問題となるのはその処理能力である。しかし、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ある”という程度の認識しかなかった。従って、まずこの最大処理能力の定義を行った。

本項においては、連続粉碎において、粉碎機内の原料滞留量を測定し、その増加速度と原料供給速度の関係性を求め、滞留量の時間的増加がゼロとなる供給速度を求めた。この供給速度以上の速度で原料を粉碎機に供給すると、粉碎機内の未粉碎原料は時間とともに増加しつづけ最終的には粉碎機を停止させると考えた。そこで、この供給速度を粉碎機の最大処理能力と定義した。

最大処理能力を定義することによって、粉碎機相互の能力比較が可能となったと考えられる。

5.1.2 木質粉碎物の形状と粒度表示⁵²⁾

通常の粉粒体は、ほぼ球形に近似することが可能であり、ふるい分けによりその大きさを測定することができる。しかし、木材を粉碎機によって粉碎した場合、繊維方向の強度が大きいため、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をとる。一般にこのような形状の粉粒体を、球形近似可能な一般の粉粒体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。本項では、粉碎物の平均ふるい目開き径と、その粉碎物の長さ、厚さ、幅との関係から、その体積を求め、この体積と同じ体積を持つ球の直径、すなわち粉碎物の球相等径をその粉碎物の平均の大きさ（代表粒径）と定義した。

このことによって、一般の粉粒体との比較が可能となったと考えられる。

5.2 各種粉碎機における最大処理能力

5.2.1 衝撃型粉碎機における最大処理能力

5.2.1.1 衝撃型粉碎機における滞留時間と粉碎機操作条件の関係⁵³⁾

最大処理能力は、原料が粉碎機に入ってから粉碎されて粉碎機から出てくるまでの時間である滞留時間と、その粉碎機が許容できる最大の粉碎原料の量（最大滞留量）の二つの要素によって決っていると考えた。本項では、この最大処理能力を決定する要素の一つである滞留時間について検討した。粉碎機が、最大処理能力以下で運転されている場合、粉碎機内の原料滞留量と供給速度との間には比例関係が見られ、この条件下では、その滞留時間は一定であると考えた。そこでこの関係から滞留時間を求め、粉碎機の操作条件との関係について検討し、滞留時間に関する実験式を得た。得られた実験式は次式で示された。

$$t = \frac{C \left[0.693 - \left(\frac{d_v}{D_e} \right)^N \right]}{d_v^{1.3} \omega^2 L^{-\frac{2}{3}}} \quad \text{①*}$$

5.2.1.2 衝撃型粉碎機の形状と最大滞留量の関係⁵⁵⁾

最大処理能力を決定するもう一つの要素ある最大原料滞留量について検討した。前項で述べたように、

粉砕機が最大処理能力以下で運転されている場合、粉砕機内の原料滞留量と供給速度との間には比例関係が見られる。最大原料滞留量は供給速度が最大処理能力の場合の原料滞留量と考えた。そこで原料滞留量と供給速度との関係において、供給速度を最大処理能力にした場合の原料滞留量から最大原料滞留量を求めた。次に、この最大乾物原料滞留量と粉砕機の形状との関係について検討し、最大原料滞留量と粉砕機の形状に関する実験式を得た。得られた実験式は次式で示された。

$$H_{u \cdot \max} = KN_r r l S_r^{\frac{1}{2}} \quad \text{②*}$$

5.2.1.3 衝撃型粉砕機の最大処理能力の推定⁵⁶⁾

前項で述べたように、粉砕機の最大処理能力は二つの要素で決定されると考えた。それは、粉砕機の最大滞留量 $H_{u \cdot \max}$ と粉砕機内の原料の滞留時間 t であり、この二つにより最大処理能力 F_{\max} (kg/h) は次式で示された。

$$F_{\max} = \frac{H_{u \cdot \max}}{t} \quad \text{③*}$$

前項までの検討で、滞留時間については以下の実験式を示した。

$$t = \frac{C \left[0.693 - \left(\frac{d_v}{D_e} \right)^N \right]}{d_v^{1.3} \omega^2 L^{-\frac{2}{3}}} \quad \text{①*}$$

最大滞留量は次式で示された。

$$H_{u \cdot \max} = KN_r r l S_r^{\frac{1}{2}} \quad \text{②*}$$

従って、式①*②*③*から、最大処理能力を推定するための実験式は得られるが、本項においては実験係数 C 、 K についてさらに詳しく検討し、木材のみならずほかの粉砕原料にも適用できる、最大処理能力の推定式を提案した。

式①*について見てみる。滞留時間は粉砕に必要な時間であり、この値は粉砕されやすい原料の場合は小さく、されにくい原料の場合は大きいはずである。従って、①*の左辺の C には、この粉砕性の因子が必要であると考えた。実験の結果、式①*における係数 C は、原料の粉砕性を示すと考えられるボールミルにおける疑似連続粉砕の滞留時間（粉砕特性時間 τ (h) とした）を用い次式で示された。

$$C = 3.98 \times 10^3 \tau \quad \text{④*}$$

従って、滞留時間 t は次式で示されることになる。

$$t = \frac{3.98 \times 10^3 \tau \left[0.693 - \left(\frac{d_v}{D_e} \right)^N \right]}{d_v^{1.3} \omega^2 L^{-\frac{2}{3}}} \quad \text{⑤*}$$

一方式②*について見てみる。②*の左辺は、主に粉砕機の容積に関するものであり、右辺は重量である。同一の容積の粉砕機であっても、粉砕原料の密度によって最大滞留量は支配されると考えた。従っ

て、②*の左辺のKには密度の因子が必要である。実験の結果係数Kは、原料に外力を加えないで充填した場合の乾物かさ密度 ρ_b (kg/m³) を用い次式で示された。

$$K = 3.95 \times 10^{-2} \times \rho_b \quad (6)^*$$

従って、最大滞留量は次式で示されることになる。

$$H_{u \cdot \max} = 3.95 \times 10^{-2} \rho_b N_r r l S_r^{\frac{1}{2}} \quad (7)^*$$

式③*を用い、原料の物性も加味した目皿付き衝撃型粉碎機の最大処理能力を求めるための実験式は次式で示された。

$$F_{\max} = \frac{H_{u \cdot \max}}{t} = \frac{9.92 \times 10^{-6} \rho_b N_r r l S_r^{\frac{1}{2}} d_v^{1.3} \omega^2 L^{-\frac{2}{3}}}{\tau \left[0.693 - \left(\frac{d_v}{D_e} \right)^N \right]} \quad (8)^*$$

この式により、目皿付き衝撃型粉碎機粉碎機の処理能力の推定が可能となったと考えられる。

5.2.2 摩砕型粉碎機における最大処理能力の推定⁵⁸⁾

前項までの検討によって目皿付き衝撃型粉碎機の最大処理能力測定法を明らかにした。同様の方法は摩砕型粉碎機にも適用できると考えた。本項においては、目皿付き衝撃型粉碎機の最大処理能力の測定方法を、摩砕型粉碎機に適用しその最大処理能力と操作条件との関係を明らかにした。

摩砕型粉碎機においても供給速度と滞留量増加速度との関係は、目皿付き衝撃型粉碎機と同様であった。この関係から同様な方法を用いて最大処理能力を測定することができた。最大処理能力は、摩砕盤の間隙の約2/3乗に比例していた。

滞留時間についても、目皿付き衝撃型粉碎機における式①*と同様な関係を有していると考えた。実験の結果、滞留時間についても目皿付き衝撃型粉碎機における式①*と同様な次式が得られた。

$$t = \frac{K^* \left[0.693 - \left(\frac{d_v}{D_e} \right)^N \right]}{d_v^n} \quad (13)^*$$

ただし、摩砕型粉碎機における定数nは、目皿付き衝撃型粉碎機と同じ1.3、定数K*は 1.1×10^{-1} であった。

以上の検討により、特定の形状の摩砕型粉碎機については、その操作条件と処理能力の関係が明らかになったと考えられる。

5.2.3 切削型粉碎機の最大処理能力の推定

前項までの検討によって目皿付き衝撃型粉碎機の最大処理能力測定法を明らかにした。同様の方法は切削型粉碎機にも適用できると考えた。本項においては、目皿付き衝撃型粉碎機の最大処理能力の測定方法を、切削型粉碎機に適用し、その最大処理能力を明らかにした。

切削型粉碎機においても、供給速度と滞留量増加速度との関係は、目皿付き衝撃型粉碎機、摩砕型粉

砕機と同様であった。この関係から同様な方法を用いて最大処理能力を測定することができた。

以上の検討により、特定の形状の切削型粉砕機については、その操作条件と処理能力の関係が明らかになったと考えられる。

5.3 各種粉砕機の適正原動機出力の推定

5.3.1 衝撃型粉砕機の最大処理能力に適合した原動機出力の推定⁶⁰⁾

粉砕機の最大処理能力は先に述べた二つの要素によって決定され、その値は実験式⑧*によって与えられる。最後に残る課題は、粉砕機に設備すべき原動機出力である。

粉砕機をその最大処理能力で運転させるためには、粉砕機の原動機出力はその最大処理能力に適合した出力でなければならないと考えた。粉砕機の原動機出力がその最大処理能力以下の場合、処理能力は原動機出力によって限定される。本項においてはこの適正原動機出力について検討した。

粉砕における動力の消費量 E (kWh/t) と、粉砕機への原料の供給速度 F (t/h)、設備すべき原動機出力 P (kW) の間には次式の関係がある。

$$P = F \times E \quad \text{⑨*}$$

実験の結果乾物原料 1 t 当たりの積算動力 E (kWh/t) は、滞留時間 t との間に次式の見いだされた。

$$E = 700 \times t \quad \text{⑩*}$$

⑨*⑩*式から定常状態に粉砕における瞬時動力は次式で示される。

$$P = F \times 700t \quad \text{⑪*}$$

粉砕機の最大処理能力に適合した原動機の瞬時動力は、式⑤*から滞留時間 t を求め、式⑪*において、供給速度 F に最大処理能力 F_{\max} を代入することによって得られる。

この検討によって、衝撃型粉砕機の最大処理能力に適合した原動機出力の推定が可能となった。

5.3.2 目皿径と粉砕物の粒度について⁶¹⁾

前項までの検討によって、与えられた目皿付き衝撃型粉砕機の最大処理能力を推定できる。さらに、目皿付き衝撃型粉砕機を設計するためには、目皿径と粉砕物の粒度について明らかにしなければならない。本項においては、この目皿径と粉砕物の粒度について検討した。

実験の結果以下の実験式を得た。

$$d_v = RS_d^{\frac{1}{2}} (r\omega^2)^n \quad \text{⑫*}$$

実験係数 R 、 n はこの順で木質 2.64, $-1/2$, トドマツ樹皮 0.457, $-1/3$ であった。

以上の検討によって、要求される粉砕物を得るための目皿の選定が可能となったと考えられる。

5.3.3 摩砕型粉砕機における適正原動機出力の推定⁵⁸⁾

本項においては、摩砕型粉砕機の適正原動機出力について検討した。

滞留時間と粉砕動力については、目皿付き衝撃型粉砕機における式⑩*と関係が得られると考えた。実験の結果目皿付き衝撃型粉砕機における式⑩*と同様な次式が得られた。

$$E = 8.4 \times 10^4 \times t \quad \text{⑭*}$$

同式から定常状態に粉砕における瞬時動力は次式で示される。

$$P = F \times 8.4 \times 10^4 \times t \quad \text{⑮*}$$

従って、摩砕型粉砕機における最大処理能力に適合した原動機の瞬時動力も目皿付き衝撃型粉砕機と同様に式⑬*から滞留時間 t を求め、式⑮*において、供給速度 F に最大処理能力 F_{\max} を代入することによって得られる。

この検討によって、特定の形状の摩砕型粉砕機の最大処理能力に適合した原動機の出力の推定が可能となった。

5.3.4 切削型粉砕機の適正原動機出力の推定⁵²⁾

本項においては、切削型粉砕機の適正原動機出力について検討した。切削型粉砕機の場合、粉砕物の形状は衝撃型粉砕機や摩砕型粉砕機と異なりその表面積を比較的容易に評価できる。従って、粉砕動力はRittingerの表示式で示されると考えた。実験の結果、粉砕動力は、目皿付き衝撃型粉砕機、摩砕型粉砕機と異なり、次式のRittingerの表示式によって示された。

$$E = K^{**} (S_w - S_{w_0}) \quad \text{⑯*}$$

ただし、 S_w は粉砕物の単位乾物重量当たりの表面積 (m^2/kg)、 S_{w_0} は粉砕原料の単位乾物重量当たりの表面積 (m^2/kg)、 K^{**} は、本実験の範囲では、粉砕機の形状や操作条件によらず木質では3.0、トドマツ樹皮では0.85となった。

従って、切削型粉砕機における適正原動機出力は、希望する粒度から式⑯*によりその粉砕に必要な動力を求め、目皿付き衝撃型粉砕機や摩砕型粉砕機と同じ方法でその最大処理能力 F_{\max} を測定し、式⑨*からその適正原動機出力 P_{\max} を求めれば良いことになる。

この検討によって、特定の形状の切削型粉砕機の最大処理能力に適合した原動機の出力の推定が可能となった。

第6章 おわりに

6.1 供試試料としての木材の物性

粉碎技術は、特に目新しい技術ではなく、穀物を粉碎し、西洋においてはパン、東洋においては麺類を製造するための基本的技術である。また、最近では、固体の表面の活性を高めるためサブミクロン単位までの粉碎技術も検討されている。しかし、粉碎機的设计については、水車を利用した石臼による粉碎技術の時代からそれほど進歩していないように思われる。

粉碎についての科学研究は、まだ100年程度の歴史しかなく、粉碎動力の研究から始まり、約30年前からは、主に粉碎速度の検討が行われている。しかし、これらの研究成果が、粉碎機の合理的な設計には結び付いていないのが現状であり。いまだ、粉碎機的设计は、それぞれのメーカーの経験的蓄積によって行われているのが現状である。その理由はいくつか考えられるが、その一番の理由は、粉碎の試験に用いる原料の選択にあった。粉碎を一つの反応として考えると、それはかなり早い反応である。反応のメカニズムを明らかにするためには、反応速度を小さくし入念に観察しなければならない。反応速度を小さくするためには、反応しづらい原料を用いればよいのだが、粉碎の試験においては通常、砂のような無機物を用いる。筆者の研究において、粉碎性の尺度としてボールミルによる粉碎特性時間を用いているが、これが粉碎の難易度を計る一つの要素である。これによると、砂は木材より10~50倍粉碎されやすいことになる。逆にいうと、木材は砂より10~50倍粉碎されにくい、すなわち粉碎反応が非常に遅く進行するので、粉碎のメカニズムを探るのに最適な試料である。この試料があったから、反応時間すなわち滞留時間の測定が可能となったし、反応時間が長かったから粉碎機内の滞留量の測定が可能となった。木材は粉碎の研究に最適な試料であったといえよう。

6.2 今後の展開

本論文においては、目皿付き衝撃型粉碎機についてのみ数台の粉碎機について、粉碎機の操作条件、形状、粉碎原料の物性とその最大処理能力の関係を明らかにした。しかし、切削型粉碎機や摩砕型粉碎機においては、それぞれ1台の粉碎機について、その操作条件と最大処理能力、最大滞留量、滞留時間の関係の検討のみにとどまり、粉碎機の形状や、粉碎原料の物性がそれぞれに及ぼす影響については検討できなかった。

また、目皿付き衝撃型粉碎機についても、特にその形状と最大処理能力については、今回とりあげなかった因子としては、固定刃の数、ハンマーの回転方向、目皿部分の広さがあげられる。この因子が相関の“バラツキ”の原因であると考えられる。今後は、これらの因子の最大処理能力に及ぼす影響についてや、切削型粉碎機や摩砕型粉碎機においても、粉碎機の形状や粉碎原料の物性がそれぞれに及ぼす影響について検討すべきであろう。

謝 辞

本研究の遂行ならびに本論文のまとめに当たり、終始御鞭撻を仰ぎ、御指導と御援助を賜った元北海道立林産試験場中川祐四男氏、元北海道立林産試験場副場長高橋裕氏、元北海道大学工学部教授遠藤一夫氏、並びに元北海道大学工学部教授山口賢治氏には衷心より感謝の意を表します。

さらに、本論文の作成に当って、北海道大学農学部教授寺沢実氏、同教授伊藤和彦氏、同学部元教授深沢和三氏、並びに同元教授笹谷宜志氏の御指導を得たことに衷心より感謝の意を表します。

本研究の遂行ならびに研究実施に協力いただいた、元北海道立林産試験場物性利用科森山実氏、北海道立林産試験場企画指導部普及課大沢清志氏、同試験場技術部成形科中村繁夫氏、同製材科速水信也氏、網走支庁遠軽地区林業指導事務所大宮康則氏の諸氏に謝意を表します。

文 献

- 1) 平成2年度北海道林業統計, 北海道林務部, 平成3年12月.
- 2) 本江 満ほか: 林産試験場月報, No281, 12-16(1975年6月).
- 3) 種田建造: 林産試験場月報, No354, 8-17(1981年7月).
- 4) 桜井孝一: 木材工業, 37(5), 239-243(1982).
- 5) 木質廃棄物再資源化技術開発事業報告書, (財)日本住宅・木材技術センター, 平成5年3月.
- 6) 遠藤 展, 森山 実, 西川介二, 斎藤 勝: バイオマス変換計画昭和63年度委託事業報告書, 北海道立林産試験場, 平成元年3月.
- 7) 窪田 実, 森山 実, 吉田兼之, 遠藤 展: バイオマス変換計画平成元年度委託事業報告書, 北海道立林産試験場, 平成2年3月.
- 8) 窪田 実, 森山 実, 吉田兼之, 遠藤 展: バイオマス変換計画平成2年度委託事業報告書, 北海道立林産試験場, 平成6年3月.
- 9) 葛西 章, 松本 章, 遠藤 展, 森山 実ほか: “蒸煮による素材化のための最適条件の検討”, バイオマス変換計画昭和60年度委託事業報告書, 北海道立林産試験場, 昭和61年3月.
- 10) 遠藤 展ほか: “蒸煮による素材化のための最適条件の検討(Ⅱ)”, バイオマス変換計画昭和61年度委託事業報告書, 北海道立林産試験場, 昭和62年3月.
- 11) 遠藤 展ほか: “蒸煮による素材化のための最適条件の検討(Ⅲ)”, バイオマス変換計画昭和62年度委託事業報告書, 北海道立林産試験場, 昭和63年3月.
- 12) 遠藤 展: “生物資源の効率的利用技術に関する総合研究”, バイオマス変換計画昭和62年度委託事業報告書, 財団法人林業科学技術振興所.
- 13) 蒸煮シラカンバによる乳牛および肉用牛の飼養マニュアル, 農林水産省, 昭和62年7月.
- 14) 蒸煮広葉樹による乳牛および肉用牛の飼養マニュアル, 農林水産省, 昭和63年10月.
- 15) 遠藤茂寿, 山口賢治, 遠藤 展: 化学工学, 22(11), 765-768(1981).
- 16) 池田修三: 林産試験場月報, No121, 6-14(1962年2月).
- 17) 齊藤藤市ほか: 林産試験場月報, No274, 3-8(1962年6月).
- 18) 齊藤藤市ほか: 林業指導所研究報告, 第32号, (1963)
- 19) 遠藤一夫ほか: 北海道大学工学部研究報告, 第60号, P.135, (昭和46年).
- 20) 鈴木 弘ほか: 北海道立林産試験場研究報告, 第52号, (1969).
- 21) 鈴木 弘ほか: 粉体工学研究会誌, 6(4), 239-246(1969).
- 22) 高橋 裕ほか: 木材学会誌, 18(1), 9-13(1972).
- 23) 鈴木 弘ほか: 粉体工学研究会誌, 8(1), 14-18(1971).
- 24) 高橋 裕ほか: 木材学会誌, 18(1), 15-19(1972).
- 25) 鈴木 弘ほか: 粉体工学研究会誌, 7(4), 279-283(1970).
- 26) 高橋 裕ほか: 木材学会誌, 18(2), 57-61(1972).
- 27) 高橋 裕ほか: 木材学会誌, 18(5), 231-236(1972).
- 28) 高橋 裕ほか: 木材学会誌, 18(5), 237-242(1972).
- 29) 高橋 裕ほか: 粉体工学研究会誌, 8(4), 258-262(1971).
- 30) 高橋 裕ほか: 粉体工学研究会誌, 8(6), 395-398(1971).
- 31) 高橋 裕ほか: 木材学会誌, 18(12), 587-591(1972).
- 32) 高橋 裕, 遠藤 展, 大沢清志, 遠藤一夫: 粉体工学研究会誌, 9(3), 161-165(1972).

- 33) 高橋 裕, 遠藤 展, 遠藤一夫: 粉体工学研究会誌, 10(1), 23-25(1973).
- 34) 高橋 裕ほか: 木材学会誌, 20(9), 430-434(1974).
- 35) 高橋 裕ほか: 木材学会誌, 20(9), 435-440(1974).
- 36) 鈴木 弘ほか: 木材学会誌, 22(5), 288-291(1976).
- 37) 遠藤 展, 高橋 裕, 遠藤一夫: 粉体工学研究会誌, 13(9), 475-479(1976).
- 38) T. G. Callcott : *Journal of the institute of fuel*, 529-539, (Nov. 1960).
- 39) D. M. Obeng and G. J. Trezek : *Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop.*, 14(2), 113-117(1975).
- 40) V. K. Jindal and L. G. Austin : *Powder Technology*, 14, 35-39(1976).
- 41) L. G. Austin and V. K. Jindal and C. Gotsis : *Powder Technology*, 22, 199-204(1979).
- 42) Geoffrey R. Shiflett and Geoge J. Trezek : *Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop.*, 18(3), 437-440(1979).
- 43) 空閑良寿, 古閑二郎, 山口賢治: 化学工学論文集, 10(2), 204-210(1984).
- 44) 田中達夫: 化学工学論文集, 2(6), 623-625(1976).
- 45) 斎藤藤市, 阿部 勝: 林産試験場月報, No126, 21-23(1962年7月).
- 46) 又木義博, 前田達郎, 福井 尚: 木材工業, 28(11), 260-265(1973).
- 47) 又木義博: 木材工業, 29(8), 337-342(1974).
- 48) 水本克夫, 長谷川益男, 唐沢 了: 木材と技術, No46, 3-8(1981).
- 49) 水本克夫, 長谷川益男, 唐沢 了: 木材と技術, No55, 1-4(1983).
- 50) 又木義博, 矢野 浩: 第30回日本木材学会研究発表要旨集, p. 125, (1980).
- 51) 遠藤 展, 高橋 裕, 山口賢治, 遠藤一夫: 粉体工学会誌, 25(3), 146-149(1988).
- 52) 遠藤 展, 高橋 裕, 山口賢治, 遠藤一夫: 粉体工学会誌, 20(2), 68-73(1983).
- 53) 遠藤 展: 粉体工学会誌, 26(10), 729-733(1989).
- 54) Masaaki Furuya, Yoji Nakajima and Tatuo Tanaka : *Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop.*, 10(4), 449-456(1971).
- 55) 遠藤 展: 粉体工学会誌, 26(12), 839-842(1989).
- 56) Hiromu Endoh : *Advanced Powder Technol.*, 3(4), 235-245(1992).
- 57) 同志社大学粉体工学研究室: 粉体と工業, 49-63(1976年8月).
- 58) 遠藤 展: 粉体工学会誌, 26(7), 505-507(1989).
- 59) W. D. May : *Pulp and Paper Magazine of Canada*, 74(1), 70-78(1973).
- 60) Hiromu Endoh : *Advanced Powder Technol.*, 4(1), 71-77(1993).
- 61) 遠藤 展, 高橋 裕, 山口賢治, 遠藤一夫: 粉体工学会誌, 21(2), 81-86(1984).
- 62) 粉体・理論と応用, 久保輝一郎ほか, 丸善株式会社.

使用記号

F_{max} : 乾物最大処理能力 (kg/h)

d_v : 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)

$H_{u \cdot max}$: 乾物最大原料滞留量 (kg)

t : 原料の平均滞留時間 (h)

C : 実験式における係数

D_e : 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 : 原料の Rosin-Rammler 粒度分布における分布定数

ω : 粉碎ハンマーの回転角速度 (rad/s)

L : 粉碎室の長さ (m)

K : 実験式における係数

N_r : 粉碎ハンマーの数

r : 粉碎ハンマー先端と回転軸までの距離 (m)

l : 粉碎ハンマーの回転方向の幅 (m)

S_r : 目皿の開孔比 (%)

τ : 原料の粉碎特性時間 (h)

ρ_b : 原料を外力を加えないで充填した場合の乾物かさ密度 (kg/m³)

P_{max} : 最大処理能力における瞬時動力 (kW)

S_d : 目皿の目の円相等径 (m)

K^* : 実験式における係数

K^{**} : 実験式における係数

S_w : 粉碎物の単位乾物重量当たりの表面積 (m²/kg)

S_{w_0} : 粉碎原料の単位乾物重量当たりの表面積 (m²/kg)

H_u : 粉碎機内の乾物原料滞留量 (kg)

F : 乾物原料の平均供給速度 (kg/h)

$H_{u \cdot s}$: 粉碎機内の定常状態における乾物原料滞留量 (kg)

d_{50} : 粉碎物の Rosin-Rammler 粒度分布における 50% 重量径 (mm)