

# 石臼の粉碎特性について

Studies on the Grinding Characteristics of Stone Mills

日高 重助\*  
Jūsuke Hidaka

森井 賢次\*  
Kenji Morii

渡辺 龍彦\*  
Tatsuhiko Watanabe

山香 求\*  
Motomu Yamaga

三輪 茂雄\*  
Shigeo Miwa

## 1. まえがき

現代の生産技術が合理性を追求して発展して来た過程で、多くの機械や道具を排除したが、石臼もそのひとつである。今から20年くらい前まで、石臼は、各家庭で手軽で便利な粉碎機として穀類など特に植物質の粉碎に使われ、日常生活に密着した生産道具であった。また、諸外国では、工業的規模で使われたこともあり、小麦製粉においては、直径1500mmの石臼が250rpm程度で運転されていた<sup>1)</sup>。しかしながら、最近では、その石臼もほとんど見ることができなくなったが、製茶(抹茶)、樹脂添加用木粉、各地の独特な焼物に使用する坏土などの粉碎には、粉碎産物の特性の点で、現代の高速粉碎機に替わることなく、今でも石臼が使われており注目すべきことである。現代の粉碎機は、非常に高速化し、大きな処理能力を有するが、その粉碎産物の特性についての配慮が充分でないところがある。

本報では、石臼の粉碎特性、とくに原料供給量、石臼の回転数、上臼の重量のちがいなど石臼の粉碎条件における基本的な項目が石臼の粉碎性能に与える影響、石臼の碎粉所要動力について調べ、さらに産地が違う数種の石臼の粉碎性能の比較を粉碎速度式を応用して行なううえで問題となる点について述べる。

過去の粉碎機となりつつある石臼であるが、その粉碎特性を明らかにしておくことは、今後の粉碎操作を考えるうえで重要である。

## 2. 実験装置および方法

実験装置を Fig. 1 に示す。石臼の回転は、動力軸から出ているアームが、上臼に固定されているリングを回

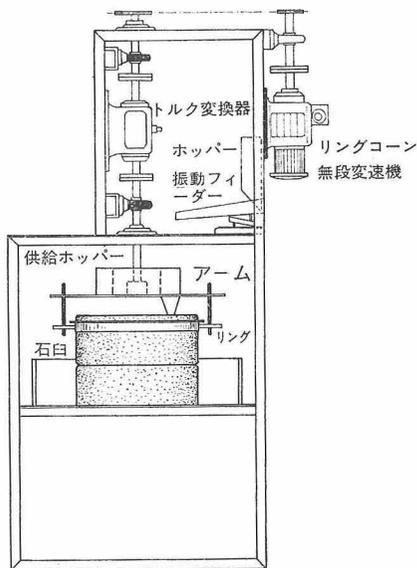


Fig. 1 実験装置の概要

転させることにより行なわれ、その回転数は、無段変速機により0~150rpmの範囲で任意に変えることができる。また、粉碎中の石臼のトルクを測定するために、動力軸にトルク変換器(抵抗線歪ゲージ式)が取り付けられており、トルクは運転中自動的に記録できる。

ホッパーから振動フィーダーで定量的に供給される粉碎試料は、まず石臼の上の供給ホッパーに入り、ホッパー内の掻き取り器(ハケ)により石臼の供給口に投入される。石臼で粉碎された試料は、受皿に入り、それを集めて産物粒度を測定した。各粉碎産物の測定試料は、石臼が定常状態に達する一定時間(約10分)粉碎した後、採取した。粉碎試料として白米(長径5220 $\mu\text{m}$ , 短径2820 $\mu\text{m}$ )を用い、粉碎産物の粒度の評価は、100目/寸(目開き約200 $\mu\text{m}$ ), XX8(目開き174 $\mu\text{m}$ ), XX12(目開き106

昭和52年2月22日受理

\* 同志社大学工学部化学工学科 (〒602 京都市上京区烏丸今出川上ル) TEL 075-251-3847

Table 1 石臼の諸元

	広島臼	三輪臼	岡崎臼	石榑臼	北木臼
直径 $D$ [mm]	270	280	302	298	365
上臼高さ $H_o$ [mm]	113	103	102	115	153
上臼重量 $W$ [kg]	15.1	14.1	17.0	19.4	39.5
臼面積 $A$ [cm <sup>2</sup> ]	573	615	716	697	1,046
下臼高さ $H_u$ [mm]	90	97	102	111	140
面圧 $P$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	0.026	0.029	0.024	0.028	0.036
主溝の数	8	8	6	8	8
副溝の数	3	4	5	4	4
ふくみ $h$ [mm]	0	4.2	7.8	0	3.4

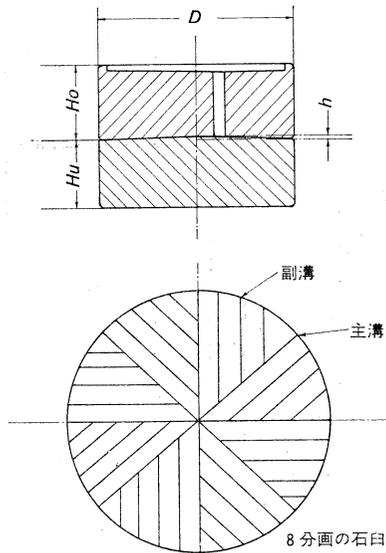


Fig. 2 石 臼

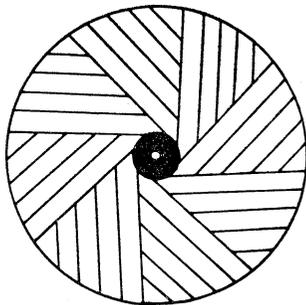


Fig. 3 北木臼の目のパターン

$\mu\text{m}$ )の絹篩により、手篩いで粒度を測定した。本報では粉砕性能の量的な評価として単位粉砕時間当りの各ふるい下生成量を用い、産物粒度の評価には、粉砕産物のふるい下%を用いた。これらのふるいの選択は、市販の米粉が大体200 $\mu\text{m}$ 全通であること、および小麦粉がXX12

全通であることによる。

実験に用いた石臼の諸元を Table 1, および Fig. 2 に示した。石質は、いずれも花崗岩系で、臼の呼称は、その石と臼の産地により示した\*。石臼の特徴として、三輪臼、岡崎臼は、他の石臼にくらべ、上臼のべこみ、下臼のふくらみが大きく、北木臼は、Fig. 3 に示すように目の状態が少し違っている。

### 3. 粉砕性能におよぼす石臼の回転数、試料供給量の影響

石臼の粉砕条件を考えると、試料の供給量と石臼の回転数は、基本的な項目であり重要である。一般的に連続式のミルにおいては、供給量が増加するにつれて粉砕産物の粒度が粗くなるが、実際に粉砕操作を行なうためには、それらの関係を定量的には握しておくことが必要である。

Fig. 4, 5 は、回転数、供給量とふるい下生成量の関係を示している。この図から明らかなように、石臼には、それぞれの回転数において、ふるい下生成量が最大になる供給量が存在し、最大生成量は回転数に比例して増加する。

Fig. 6, 7 は、岡崎臼による粉砕試験で、粉砕産物の粒度測定にXX8とXX12のふるいを用いた場合のふるい下生成量の変化を示している。XX8ふるい下生成量が最大になる供給量とXX12ふるい下生成量が最大とな

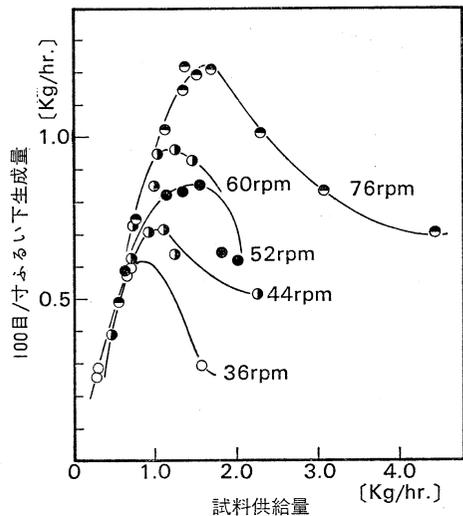


Fig. 4 100目/寸ふるい下生成量と供給量、回転数の関係 (広島臼)

\* 三輪臼は、産地名ではなく、筆者の1人の三輪が製作したもので花崗岩の産地は、岡崎(愛知県)である。なお石榑は三重県、北木は岡山県である。

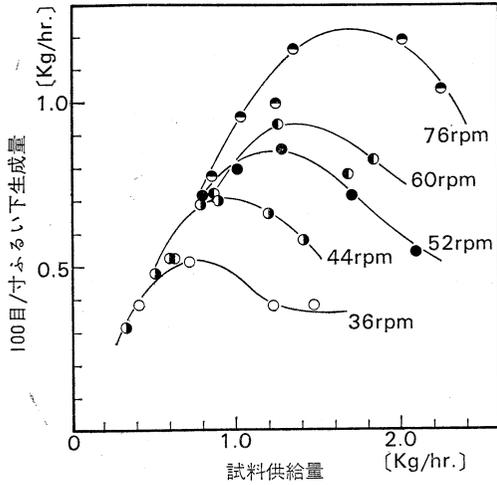


Fig. 5 100目/寸ふるい下生成量と供給量、回転数の関係 (三輪臼)

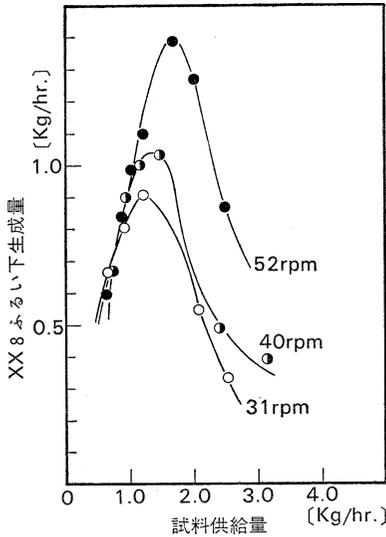


Fig. 6 XX8ふるい下生成量と供給量、回転数の関係 (岡崎臼)

る供給量は異なり、粒度測定ふるい目開きが小さくなるにつれ最大生成量を与える供給量も小さくなる。この時の粉碎産物のふるい下%と供給量の関係を Fig. 8 に示した。ある供給量に達するまでふるい下%の変化は小さいが、さらに供給量を増すとふるい下%が急激に減少する。Fig. 8 の中に示すように、最大ふるい下生成量を与える供給量は、粉碎産物のふるい下%が急激な減少を始める点の供給量と大体一致する。

#### 4. 上臼重量の影響

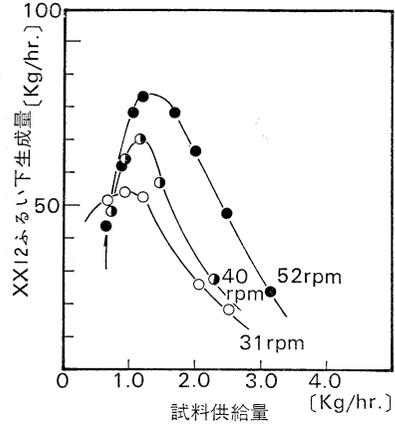


Fig. 7 XX12ふるい下生成量と供給量、回転数の関係 (岡崎臼)

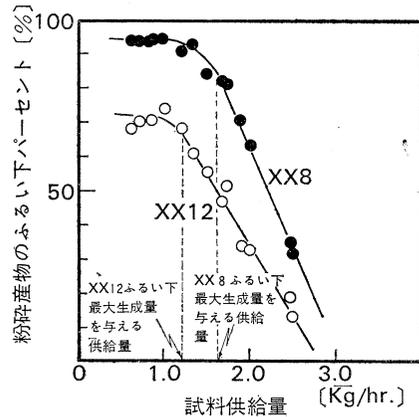


Fig. 8 粉碎産物のふるい下%と供給量の関係 (岡崎臼 50rpm)

石臼内に供給された粒子群は、主として溝と溝の間の石臼面で上臼の回転により剪断方向の力を受けて粉碎される。粉碎された粒子は、主溝および副溝を通して排出されるが、この粒子の挙動に上臼重量が大きな影響を与える。

Fig. 9, 10 は、上臼の重量が石臼の粉碎性能に与える影響を調べるために、岡崎臼の上臼(上臼重量17kg)の上にスチールボールを載せることにより上臼重量を変えて粉碎した結果を示している。上臼重量が粉碎性能におよぼす影響は、前節の回転数の影響 (Fig. 4~7) とまったく同じ傾向を示し、上臼の重量に比例して粉碎量が増加する。Fig. 11 は、上臼重量、石臼の回転数と XX8 ふるい下最大生成量との関係を示している。この図から、たとえば、上臼重量を 5kg 増加することは、石臼の回転数を10回転増加した時と同じ粉碎量を示すことが分る。

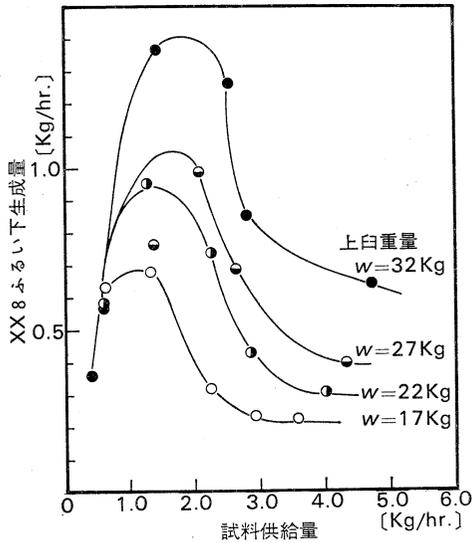


Fig. 9 ふるい下生成量におよぼす上臼重量の影響 (30rpm)

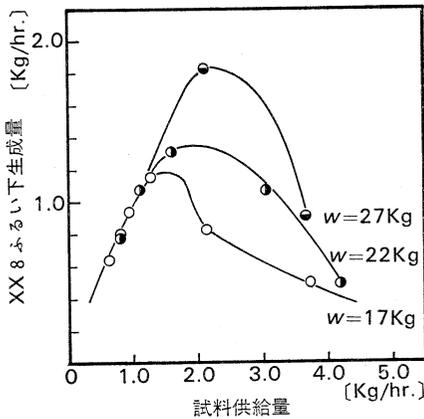


Fig. 10 ふるい下生成量におよぼす上臼重量の影響 (50rpm)

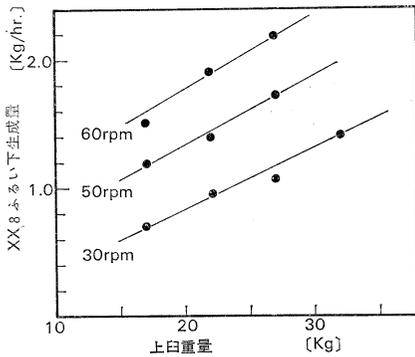


Fig. 11 ふるい下最大生成量と上臼重量, 回転数の関係 (岡崎臼)

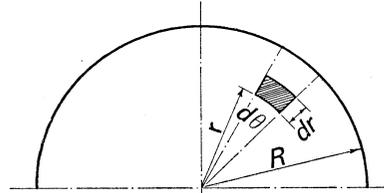


Fig. 12 石臼のトルク計算説明図

### 5. 粉碎所要動力について

石臼の粉碎所要動力を求めるために, 回転している石臼のトルクについて考察する。

Fig. 12 に示すように, いま, 石臼の半径を  $R$ , 石臼の粉碎面の面積を  $A$ , 上臼の重量を  $W$ , 上臼の底面と粉碎物との動摩擦係数を  $\mu_k$  とし,  $\mu_k$  は石臼全面で均一であると仮定すると, Fig. 12 に示した微小面積  $r \cdot dr \cdot d\theta$  に働く摩擦力  $dF$  は, 次式で与えられる。

$$dF = \frac{W}{A} \cdot \mu_k \cdot r \cdot dr \cdot d\theta \quad \dots\dots(1)$$

また, 微小面積  $r \cdot dr \cdot d\theta$  に関する摩擦モーメント  $dT$  は, 次式により与えられる。

$$dT = \frac{W}{A} \cdot \mu_k \cdot r^2 dr d\theta \quad \dots\dots(2)$$

したがって, (2)式の摩擦モーメントを石臼全面について考えることにより, 石臼の回転に必要なトルクは, 次式で与えられる。

$$T = \frac{W}{A} \cdot \mu_k \int_0^{2\pi} \int_0^R r^2 dr d\theta = \frac{2}{3} \mu_k \cdot W \cdot R \quad \dots\dots(3)$$

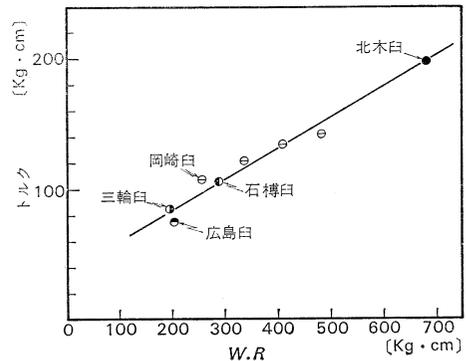


Fig. 13 石臼のトルクWRとの関係

Fig. 13 は、各石臼の粉碎産物の粒度が大体同じである時 (XX8 ふるい下%が約95%) の石臼のトルクの実測値と  $W \cdot R$  の関係を示したものである。各石臼のトルクは、良い直線関係を示しており、(3)式が成立していることが確認される。

したがって、動摩擦係数  $\mu_k$  が分れば、(3)式によりいろいろな石臼のトルクを推定することができ、石臼の粉碎所要動力を算出することができる。Fig. 13 から、白米の粉碎における動摩擦係数  $\mu_k$  を算出すると、0.495となる。この値は、石臼面の面粗度などを考えると妥当な値と考える。

## 6. 石臼内の粉碎物の滞留量について

石臼の粉碎性能は、目の形状、粉碎面の面粗度など多くの因子の影響を受ける。また日本各地には、その風土に応じていろいろな石質、形態の石臼があり、それらの石臼の粉碎性能を比較することは非常に興味のある問題である。粉碎性能の比較法として、粉碎速度定数を用いる方法が考えられるが、石臼のような連続式ミルに粉碎速度式を適用する際、粉碎物のミル内滞留時間の測定を必要とする。滞留時間の測定法としては、いろいろな方法が考えられるが、三輪は、ふるい分けにおける網面上の粒子の移送速度の測定に次の式を用い、連続式の粉碎機であるボールミルや振動ミルの滞留時間  $t$  の測定に応用できることを示した<sup>3)</sup>。

$$t = \frac{L}{u} = \frac{q}{Q} \quad \dots\dots(4)$$

ここで、 $Q$ は原料供給量、 $u$ はミル通過線速度、 $q$ はミル内滞留量、 $L$ はミルの長さである。したがって、石臼についても(4)式の関係が成立すれば、ミル内の瞬間滞留量  $q$  を測定することにより滞留時間を得ることができ

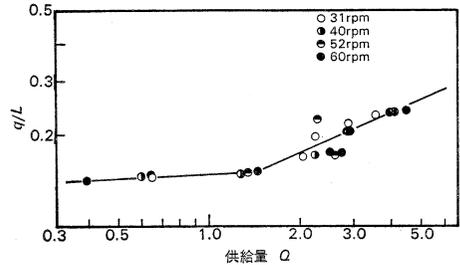


Fig. 14 供給量  $Q$  と  $q/L$  の関係 (岡崎臼)

る。

そこで、(4)式の関係調べるために石臼の粉碎状態が定常に達した後、試料の供給を止めると同時に石臼の回転も止め、その時の石臼内にある滞留物の重量を測定した。Fig. 14 は、岡崎臼による測定結果を示しており、図のタテ軸は  $\log(q/L)$ 、ヨコ軸は  $\log Q$  である。(4)式の関係が成立すれば、勾配1の直線関係が得られるはずであるが、試料供給量  $Q$  が 1.3~1.4kg/hr. の付近で急に変化する二本の直線となる。他の石臼の場合も同様の傾向を示しており、石臼内の粒子群のように、その運動に大きな強制力が働く場合は、(4)式が成立しないものと考えられる。

## 7. むすび

一般的な連続式ミルと同じく石臼にもある粒度の粉碎産物をもっとも多量に生成する最適粉碎条件が存在し、その状態を白米について定量的に示した。また石臼の粉碎所要動力を推定するためには、粉碎中の石臼のトルクを知ることが必要であり、そのトルクの推定には(3)式が使用できることが分った。石臼内の粒子群の挙動は複雑で、(4)式関係を満足しなかった。今後、石臼の目の形状と粉碎性能、石臼による粉碎産物の特性などについての検討が必要である。

## 参 考 文 献

- 1) Kozmin, P.E. : Flour Milling (George Routledge & Sons, 1921)
- 2) 三輪茂雄 : 石臼の謎, (産業技術センター, 1975)
- 3) 三輪茂雄 : 化学工学通論II (朝倉書店, 1973)

**Authors' Abstract**

**Studies on the Grinding Characteristics of Stone Mills**

by

Jusuke HIDAKA, Kenji MORII, Tatsuhiko WATANABE, Motomu YAMAGA, Shigeo MIWA

(Department of Chemical Engineering, Doshisha University)

The effects of feed rate, rate of revolution, and weight of upper runner on the grinding performance of the stone mill were investigated and the optimum condition in operating the stone mill was shown. The material used in grinding was a rice.

Power consumption of the stone mill could be estimated from the derived equation based on the friction theory.

Retention time of particles in the stone mill was also discussed. The behavior of particles in the stone mill is very complicated and it is difficult to predict the retention time from the material balance.