

微粉碎に要する仕事量の予測

神田 良照
工学部物質化学工学科

ESTIMATION OF FINE GRINDING ENERGY

Yoshiteru KANDA

Department of Chemistry and Chemical
Engineering, Faculty of Engineering
(平成17年9月30日受理)

Abstract

The demand for fine particles is increasing in many industries. It is important to estimate the fine grindability of solids materials. The Work Index proposed by Bond is an important factor in evaluating a fine grinding process. In this paper, the author proposed a corresponding Work Index which is proportional to the Work Index. It could be estimated by the examination of the zero-order increasing rate constant of mass fraction less than a sieving size. The relationship between the corresponding Work Index and the sieving size was studied. As the results, it was found that the corresponding Work Index is useful for estimating the fine grinding energy.

1 はじめに

粉碎は産業技術の中において、古い単位操作の一つであることが想像できる。それは、粉碎は固体の破壊であり、極めて単純で、機械、理論がなくても簡単な道具によってその目的が生活の中でほぼ達せられてきたことにある。このようなことから、理論的検討が後追いつく分野を残すことになった。

近年の産業技術の発展に伴う新しい材料の出現や新しい用途と共に粉碎もファイン化の傾向にある。また、材料の改質、複合化、メカニカルアロイング等の研究に見られるように粉碎操作の新しい利用も行われるようになり、それぞれの目的に合った粉碎機が開発されている¹⁾。さらに、産業廃棄物の処理、資源リサイクルの高まりとともに大型粉碎機の占める役割も大きくなってきている。以上のことから分かるように粉碎機の大型化、省エネルギープロセスの開発も加え粉碎に関する研究も多岐になってきている。しかし粉碎操作の大部分は固体材料の細分化であり、その基本的研

究は、

- 1) 粉碎に要する仕事量
- 2) 粉碎によって得られた碎成物の粒子径分布
- 3) 1), 2)を結びつけた粉碎速度論になる。

ここでは、この中から特に微粉碎に要する仕事量の予測について述べる。

2 粉碎前後の粒子径（代表粒子径）の変化と粉碎仕事量

次式に示す粒子径 x と粉碎仕事量 E の関係は1937年に出版された“Principles of Chemical Engineering”²⁾（同名の本は1923年にW.H.Walker, W.K.Lewis, W.H.MacAdamsによって出版されているがこの中に式(1)が記載されているかどうか、手元に本がないためわからない。同本はその後、3次にわたる改訂が行われている³⁾）の中でLewisによりRittinger（1867年）とKick（1885年）の2つの粉碎エネルギー法則をまとめた式として

紹介されているが、今日では1952年に発表された Bond⁴⁾（Bondは論文の中で粉碎仕事量をWで表わしている）の粉碎理論も含めて紹介されることが多い。

$$dE = -cx^{-n} dx \dots\dots\dots(1)$$

ここで、Cは比例定数

2.1 Rittingerの法則

粉碎の前後で違っているのは表面積が増加していることである。この物理的概念がRittingerの考えで式(1)を $n=2$ で積分すると得られる。

$$E = C_R (S_p - S_f) \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 C_R は砕料によって決まる定数、 S_f 、 S_p はそれぞれ粉碎前後の比表面積 ($m^2 \cdot kg^{-1}$) である。

2.2 Kickの法則

式(1)を $n=1$ で積分すると次式となる。

$$E = C_k \ln \frac{x_f}{x_p} \dots\dots\dots(3)$$

C_k は定数で、 x_f 、 x_p はそれぞれ粉碎前後の粒子径を表す。これは幾何学的に相似な変形を生じさせるために要する仕事量は粒子径には関係なく砕料の体積に比例し、単位質量当たりの仕事量は粉碎比で決まることを示している。

2.3 Bondの理論⁴⁾

Rittinger, Kickの両法則は単一粒子の理想的な破碎について述べたように思える。これに対してBondは全ての粉碎は無限に大きい粒子（固体）を粒子径がゼロの無限個数の粒子に粉碎する途中の現象であるとして、式(1)を $n=1.5$ で積分した次式を提案した。

$$E = C_B (x_p^{-1/2} - x_f^{-1/2}) \dots\dots\dots(4)$$

さらにBondは上式の実用性を高めて次式を提案している。

$$W = W_i \left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right) \dots\dots\dots(5)$$

ここで、 $F(\mu m)$ 、 $P(\mu m)$ はそれぞれ粉碎前後の80%通過粒子径である。ここでは粉碎で得られる粉体は粒子径に広がり（粒子径分布）があり、

この広がり我代表する粒子径（80%通過粒子径）が使われている。式(5)が広く使われている理由にはBondは式(5)中の W_i (kWh/ton)を砕料の粉碎抵抗を表す仕事指数、WorkIndexと定義し、多くの砕料について測定^{4,5)}していることによる。仕事指数については後でまた詳しく述べる。

3 単一粒子の破碎エネルギー

粉碎機内ではすべての粒子が同じように粉碎されていくことはないので、粉碎を単純に単一粒子の破碎の集積とは考えられない。しかし、粉碎は基本的には固体の破壊のくり返しであるため単一粒子の破碎（破壊）についても考えておく必要がある。

3.1 球の破碎エネルギー

一般に、粉碎プロセスで扱われる粒子は不規則形状であるが粒子の形状の基本は球であること、不規則粒子の破碎は球の破碎に近いこと⁶⁾などによりここでは球の破碎について述べる。図1に示すように直径（粒子径）が x の球を平行平板で破壊する場合、破碎までに球粒子、単位質量当たり蓄えられる弾性ひずみエネルギー E/M は次式になる⁷⁻⁹⁾。

$$\frac{E}{M} = C_1 S^{5/3} \dots\dots\dots(6)$$

ここで、 S は球圧壊強度、定数 C_1 は粒子の密度、ポアソン比、ヤング率で決まる値である。式(6)を実験的に確かめた結果をホウケイ酸ガラス、長石について図2に示した⁹⁾。

3.2 強度の粒子径（体積）による変化

欠陥を全く含まない完全な固体の強度を理想（理論）的強度と呼んでいる。これは原子間あるいは分子間結合力に相当する強さで次式となる。

$$S_{th} = \left(\frac{\gamma Y}{a} \right)^{1/2} \dots\dots\dots(7)$$

ここで、 S_{th} は理想的強度、 a は格子定数、 γ は表面エネルギー、 Y はヤング率である。

一方実測される強度はこの理想的強度の1/100～1/1000といわれており、この相違は次式に示すようにGriffith¹⁰⁾によって説明されている。

$$S_{ex} = \left(\frac{2\gamma Y}{\pi C} \right)^{1/2} \dots\dots\dots(8)$$

ここで、 S_{ex} は実測強度、 C はグリフィス・クラックの大きさである。実測強度は式(8)に示すようにクラックの大きさによって決まる。固体内に大きなクラックが存在する確率は試験片（粒子）の体積に比例するため強度を測定する試験片の体積を V 、その時の強度を S とすると次式の関係が成立する¹¹⁾。

$$S = C_2 V^{-1/m} \dots\dots\dots(9)$$

ここで、 C_2 は単位体積の試験片とその強度によって決まる定数、また m はクラックの大きさ（強度）の分布関数であるワイブル分布の定数でワイブルの均一性係数と呼ばれ、1より大きい値である¹²⁾。式(9)は強度の寸法効果とよばれており、金属材料¹³⁾、天然鉱物、ガラス^{14, 15)}等について式(9)の関係が測定されている。

3.3 破砕エネルギーの粒子径による変化

式(6)、(9)から、粒子径 x の粒子の破砕エネルギー E とこの粒子単位質量当たりの破砕エネルギー（弾性ひずみエネルギー） E/M を導くことができ、次式となる⁹⁾。

$$E = C_3 x^{(3m-5)/m} \dots\dots\dots(10)$$

$$\frac{E}{M} = C_4 x^{-5/m} \dots\dots\dots(11)$$

ここで、 C_3, C_4 は C_1, C_2 と同様に粒子の物性値によって決まる値である。図3に式(10)、(11)の関係を長石、大理石、石膏について示した⁹⁾。

3.4 単粒子破砕実験結果から微粉砕、超微粉砕に対する考え方

図3の左の縦軸 E/M を見ると粒子径の減少に伴う強度の増大により微粉砕、超微粉砕には多大のエネルギーが必要になることがわかる。しかし、右の縦軸が示す粒子一個を破砕するエネルギー、 E は当然のことではあるが、粒子径の減少とともに急激に減少する。それ故に粉砕により、微粒子、超微粒子を得るためには砕料粒子に確実にエネルギーを与える工夫をすることが必要である^{16 ~21)}。そのひとつの方法が、ボールミル、振動ミ

ル、遊星ミル、攪拌ミルなどの粉砕媒体を用いる粉砕機に見られる。それは水中で粉砕することにより粒子の凝集力を弱くし、また、より小さい粉砕媒体を使うことにより砕料粒子と粉砕媒体との衝突確率を増加させる工夫がされていることである。横山ら¹⁹⁾は4種類の媒体を使いボール径を0.5～8mmに変えて遊星ミルによりケイ砂の水中粉砕を行い、メディアン径で表した粉砕限界粒子径 x_{eq1} とボール径 d_B との関係として次式を報告している。

$$x_{eq1} \propto d_B^{0.5} \dots\dots\dots(12)$$

上式は微粉砕にはボール径を小さくし、個数を増加することが有効であることを示している。現在、攪拌ミルで最小ボール径として0.03mmを使った結果が報告されている²²⁾。

4 粉砕性を表す尺度

粉砕原料の粉砕性（被粉砕性と呼ぶ場合もある）を表す尺度はこれまでに様々な定義、手法に基づく粉砕性指数が多く提案されている²³⁾。この中で代表的な指数が以下の二つであると思われる。

4.1 Bondの粉砕仕事指数（Work-Index, ワークインデックス）

これは一定量の砕成物を得るのに要する仕事量を測定して算出する指数である。先に示した式(5)の中の W_i である。Bondの理論によると工業的所要粉砕仕事量 W (kWh/ton) は粉砕前後の80%通過粒子径 F, P が一定の時は粉砕仕事指数 W_i に比例する。よってこの W_i は砕料の粉砕抵抗を表わす指数で一種の物性値とみることができる。1969年に W_i の測定法がJISに制定され、その後1976年の国際単位系の導入はあったが大きな改訂はなく現在に至っている²⁴⁾。 W_i の算出には次式が使われる。

$$W_i = \frac{1.1 \times 44.5}{P_1^{0.23} G_{bp}^{0.82} \left(\frac{10}{\sqrt{P'}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right)} \dots\dots\dots(13)$$

ここで、 P_1 (μm)は粉砕試験に用いるふるいの目開き、 P' (μm)は P_1 以下の砕成物の80%通過粒子径、 G_{bp} (g/rev) はボールミル粉砕能と呼ばれミル1回転当たりの P_1 以下の生成質量である。

4.2 ハードグローブ粉砕性指数, HGI

これは一定量の仕事を碎料に加えて得られる碎成物量で定まる指数で粉砕のしやすさを表す。すなわち一定の粒子径, 質量をハードグローブ試験機²⁵⁾に装入し, 碎料に一定荷重を加え, 一定回転数粉砕を行った後の75 μ m以下の碎成物質量W (g)を測定し, 次式よりHGIを算出する。

$$HGI = 13 + 6.93W \quad \dots\dots\dots(14)$$

HGIは W_i の測定に比べて簡便なため両者の相関式が提案されている^{26~28)}。

5 微粉砕域における粉砕性の評価,

WorkIndex相当数の提案

W_i の測定には式(13)からもわかるように碎成物の分級に用いるふるいの目開き P_1 の選択と G_{bp} の測定が重要である。 P_1 は一般的に150 μ mが用いられることが多いようである。また, HGIの測定には評価粒子径として75 μ mが用いられている。粉砕の主な目的は鉱山技術における有効成分分離のための前処理, いわゆる単体分離にあった。例えば成分分離法の一つである浮遊選鉱においては原料となる粉体は数10 μ m程度である。しかし, 近年の微粉体, 超微粉体の必要性から粉砕技術もファイン化の傾向が続いている。また碎料の物性値の一種とも考えることもできる W_i は, W_i の測定に使う式(13)の粉砕試験の分級に用いるふるいの目開き P_1 の値を変えると W_i の値も変化することが指適されている^{5, 27, 29)}。これは式(5)の P が100 μ mの時の W_i をBondは³⁰⁾Constant WorkIndexと提示していることからわかる。Bond自身も微粉砕における粉砕仕事量の増大を指適しており, P が70 μ mより小さくなると W_i の補正が必要であるとして次式の補正係数 A_1 を1961年²⁶⁾に提案している。

$$A_1 = \left(\frac{P + 10.3}{1.145P} \right) \quad \dots\dots\dots(15)$$

5.1 WorkIndex相当数について

各種の工業製品, 部品の高機能化, 小型化により原料となる粉体もますますファイン化の傾向にあり W_i の補正は式(15)で十分だろうかという疑問がでてくる。Bondは W_i の測定に式(13)³¹⁾の前に次式を提案している⁴⁾。

$$W_i = \frac{1.1 \times 16 (P_1 / 100)^{0.5}}{G_{bp}^{0.82}} \quad \dots\dots\dots(16)$$

式(13)は式(16)を改めた式であるが, 日本が W_i の測定法をJISにする時, (社)日本鉱業会が工業技術院からの委託を受け検討を行っている。そして式(13), (16)両式から算出した W_i の測定値には大差がなかった結果を報告している³²⁾。式(16)の G_{bp} は目開き P_1 以下のミル一回転当たりの生成質量であるので, 粒子径以下の生成速度に比例するとみることができ, 特に粉砕初期においては図4に示すように式(17)の0次の生成速度式が成立する³³⁾。粉砕初期は粉砕効率も良く粉砕速度も大きいのでこの一番良い状態で碎料の粉砕性を評価すると以下のようなようになる。

$$Q_{xc} = k_{xc} \cdot t \quad \dots\dots\dots(17)$$

ここで, Q_{xc} は粉砕時間 t における粒子径 x_c 以下の質量分率, また, k_{xc} は生成速度定数である。

粉砕時間 t における粒子径 x_c 以下の生成質量 W_{xc} は粉砕機内に供給した碎料の質量を W_s とすると次式になる。

$$W_{xc} = Q_{xc} \cdot W_s = k_{xc} \cdot W_s \cdot t \quad \dots\dots\dots(18)$$

式(18)から W_{xc}/t は G_{bp} に比例するので

$$G_{bp} \propto W_{xc} / t = k_{xc} W_s \quad \dots\dots\dots(19)$$

となる。さらに式(16)において P_1 は x_c に比例するので式(16)と(19)から次式の比例関係が成立する。

$$W_i \propto P_1^{0.5} G_{bp}^{-0.82} \propto x_c^{0.5} (k_{xc} \cdot W_s)^{-0.82} \quad \dots\dots\dots(20)$$

上式の右辺を W_{ic} とおいて, WorkIndex相当数と呼び次式のように定義した。

$$W_{ic} = x_c^{0.5} \cdot (k_{xc} \cdot W_s)^{-0.82} \quad \dots\dots\dots(21)$$

W_{ic} はWorkIndex, W_i に比例する値であり, 特に W_{ic} を評価粒子径による変化として表わすことができるため碎料, 粉砕機の微粉砕性の評価に使えるものと考えている。

図5に石英ガラスをボールミルで粉砕した時の W_{ic} の評価粒子径(分級粒子径)による変化を示した。 W_{ic} は粒子径20 μ m付近まではほぼ一定値を示し, 碎料固有の値としての性質が認められるが, 20 μ m以下の微粒域では増加傾向にあり微粉砕の難しさを表している³³⁾。

5.2 WorkIndex測定条件に対する考察³⁴⁾

JISによる W_i の測定は当然のことであるが測定条件が決められ、それは砕料の種類に関わらず一定である。そのため W_i 測定の粉碎条件自体が問題になることが考えられる。適当と思われる粉碎条件は砕料の種類によって変わることは十分理解できることであり、経験することも多い。これらのことを考え合わせると砕料の種類に関わらず一定条件で測定された W_i を使って粉碎仕事量を予測する場合、仕事量 W が砕料によっては高めに見積もられる可能性が考えられる。

砕料に適した粉碎条件あるいは粉碎機の能力評価には目的によって種々あると思われるが、ここでは粉碎機内への砕料の1)供給粒子径が大きいこと、それに加えて2)微粉の生成量が多くなる時を粉碎に適した条件とした。条件1)については次式に示す単一粒度の供給粒子の質量比 $R(-)$ の一次減少速度、すなわち $K_1(\text{min}^{-1})$ が最大となることとし、

$$-\frac{dR}{dt} = K_1 R \dots\dots\dots(22)$$

条件2)については式(17)と同形であるが次式に示す0次の生成速度、すなわち $K_{xc}(\text{g}/\text{min})$ が最大にあるところとした。

$$\frac{dW_{xc}}{dt} = K_{xc} \dots\dots\dots(23)$$

5種類の試料について式(22)の K_1 、式(23)の K_{xc} (粒子径 x_c はミル内に供給した粒子径の1/6とした)が最大となる粉碎条件を表1に示した。表1を見ると全体として硬くて強度の大きい砕料はボール質量、砕料の質量も多め、砕料の粒子径も大きめにある。表1をもとに最適粉碎条件の異なる石英ガラスと石膏に注目し、石膏の W_i を測定する条件が粉碎仕事量の予測に与える影響を検討した。表1に示した石英ガラスの最適条件と石膏の最適条件でそれぞれ石膏の W_{ic} を測定した結果を図6に示す。粉碎条件により明らかに差が見られる。この違いを明確にするため長石、石灰石、石膏をそれぞれの砕料の最適条件で測定したWork Index相当数 $W_{ic}(0)$ と各砕料を石英ガラスの最適条件で測定したWork Index相当数 $W_{ic}(SG)$ との比と評価粒子径との関係を図7に示した。長石ではほとんど差が認められないが、石灰石、石膏に

おいては相当の差が生じている。さらに石膏ではその差は評価粒子径によっても異なっている。これらは数少ない砕料についての測定結果であるが、砕料の種類に関わらず一定条件での粉碎実験から測定した粉碎性をもとに工業的粉碎仕事量を正しく評価するには無理があるように思える。今後さらに検討していく必要がある。

6 乾式・湿式微粉砕の比較

粉碎は微粉体製造に広く用いられており、大別すると乾式と湿式の2つの方式がある。乾式粉碎は、脱水、乾燥操作などの後処理工程を経ずに砕成物を回収できるが、粉碎の進行とともに、砕成物の付着、凝集が顕著になるため、粉碎効率が低下し、微粉砕が難しくなる。これに対し、湿式粉碎は、防塵、防音効果、砕料の強度低下や水の分散作用による粉碎後の砕成物の分級効率の向上により、乾式粉碎に比べ、微粉砕速度が大きくなる³⁵⁾。

6.1 任意粒子径以下の生成速度

図8には粒子径 $x_c=75, 20, 3\mu\text{m}$ を例に、乾式、湿式粉碎における粒子径 x_c 以下の生成率と粉碎時間の関係の比較を示す。この図によると、いずれの粒子径においても、湿式が乾式よりも微粉の生成速度が大きくなっている。

6.2 乾式、湿式粉碎におけるWorkIndex相当数の比較

図9に測定した生成速度定数 k_{xc} を用いて式(21)により算出したWork Index相当数と評価粒子径の関係を示す。乾式および湿式粉碎によるWork Index相当数を比較すると、湿式が乾式よりも低い値を示しており、粉碎性が向上していることがわかる。また、乾式、湿式粉碎ともに $20\mu\text{m}$ 近辺までWork Index相当数は、ほぼ一定となるが、この粒子径以下の微粉域では増加しており、粉碎方式を変えても微粉砕が難しくなることを示している。Work Index相当数を使えば、粉碎方法、機械の違いによる微粉砕域における粉碎仕事量に比較・検討が可能と思われる。

7 おわりに

工業的粉碎仕事量の推定についてで、著者の考

えも含めて紹介してきた。これらは全て粉碎実験を行うことが基本となっている。その理由は、粉碎は砕料に対してあらゆる様式の破壊作用がくり返し加えられる操作であり、また破壊過程も静的、動的、衝撃荷重下のどれも含まれており、荷重状態も複雑な分布を有する。さらに砕料の粉碎性の評価をむずかしくしているのは、粉碎は破壊後の粒子(砕成物)の細さ、その分布によっても評価されることにある。破壊の様子は砕料の種類によって大きく異なるため、砕料に加えられた仕事量が一定でも砕成物の細さ、分布が異なり、このことがさらに評価を複雑にしている。このようなことから粉碎性の評価、あるいは粉碎仕事量の予測には粉碎実験を行うことが重要である。さらに粉碎プロセスで扱われる粉体は膨大になるため、仕事量の予測の少しのズレが全体のエネルギーの損失を大きくすることもその理由である。しかし、粉碎試験には時間を要するため砕料の簡単な物性測定から粉碎性の予測をする試みもこれまでに行われてきている^{23, 36~39)}が、ここでは省略した。

文 献

- 1) 神田良照: "粉碎の研究と技術史に関する調査", 素材物性学雑誌, 9, 87-110 (1996)
- 2) Walker, W.H., W.K.Lewis, W.H. MacAdams and E.R.Gilliland: "Principles of Chemical Engineering", McGraw-Hill, P.255 (1937)
- 3) 化学工学会編: "日本の化学産業技術", 工業調査会, P.20, (1997)
- 4) Bond, F.C.: "The Third Theory of Commi-nution", Trans.AIME, Min.Eng., 193, 484-494 (1952)
- 5) Bond, F.C.: "Crushing and Grinding Calculations Part II, Brit.Chem.Eng., 6, 543-548 (1961)
- 6) 神田良照, 八嶋三郎, 下飯坂潤三: "不規則形状粒子の破碎における寸法効果とエネルギー法則", 日本鉱業会誌, 86, 847-852 (1970)
- 7) Timoshenko, S. and J.N.Goodier: "Theory of Elasticity", McGraw-Hill, P.372 (1951)
- 8) 平松良雄, 岡行俊, 木山英郎: "非整形試験片による岩石の引張り強さの迅速試験", 日本鉱業会誌, 81, 1024-1030 (1965)
- 9) 神田良照, 佐野茂, 齋藤文良, 八嶋三郎: "単粒子破碎における粒径と破碎エネルギーとの関係", 化学工学論文集, 10, 108-112 (1984)
- 10) Griffith, A.A.: "The Theory of Rupture", First Int.Cong.Appl.Mech., 55-63 (1924)
- 11) Epstein, B.: "Statistical Aspects of Fracture Problems", J. Appl.Phys., 19, 140-147 (1948)
- 12) Weibull, W.: "A Statistical Theory of the Strength of Materials", Ing.Vetens kaps Akad.Handl., No.151, 1-45 (1948)
- 13) 横堀武夫: "材料強度学", 技報堂, P.86 (1967)
- 14) Bergstrom, B.H., D.D.Crabbtree and C.L.Sollenberger: "Feed Size Effects in Single Particle Crushing", Trans.Soc.Min.Engr., Dec.433-441 (1963)
- 15) 八嶋三郎, 齋藤文良: "単粒子破碎における寸法効果", 粉体工学会誌, 16, 714-719 (1979)
- 16) Kanda.Y., Y.Abe, and H.Sasaki: "An Examination of Ultra-Fine Grinding by Preferential Grinding", Powder Technol., 56, 143-148 (1988)
- 17) 神田良照, 安部保志, 小山田忠昭: "超微粉碎に対する一考察—サイズの大きく異なる2成分媒体の効果—", 粉体工学会誌, 26, 406-410 (1989)
- 18) 横山豊和, 谷山芳樹, 神保元二, 趙千秋: "遊星ミルによる珪砂の水中粉碎における粉碎平衡粒度", 粉体工学会誌, 28, 751-758 (1991)
- 19) 横山豊和, 窪田輝夫, 神保元二: "遊星ミルによるアルミナ粉の水中粉碎限界", 粉体工学会誌, 29, 102-109 (1992)
- 20) 田中達夫: "媒体を用いる超微粉碎の最適媒体径の決定について", 粉体工学会誌, 31, 25-31 (1994)
- 21) Kanda.Y., T.Sasaki, M.Shishido and S.Sano: "Fine grinding for the preparation of a highly concentrated coal-water mixture", Proc. XX.IMPC., Vol.2, Aachen, Germany, September, 21-26, P.261-266 (1997)
- 22) 堀江弘道, 塩崎修司, 飯島富士夫: "国際粉体工業展2004年カメラルボ", 粉体と工業, 37, 27-40 (2005)
- 23) 松居国夫: "粉碎能の測定", 化学工学, 35, 268-276 (1971)
- 24) JIS M4002 (1976)

- 25) JIS M8801 (1993)
- 26) Bond, F.C. : "Crushing & Grinding Calculations Part I", Brit.Chem.Engr., 6, 378-385 (1961)
- 27) 石原透 : "各鉱山提供試料による W_i 試験の結果と現場ミルの W_i との比較解析", 日本鉱業会誌, 81, 1064-1071 (1965)
- 28) 本間栄五郎, 磯野直真, 井上敏雄 : "セメント用諸原料の粉碎仕事指数と被粉碎性との関係", 粉体工学研究会誌, 4, 916-920 (1967)
- 29) Smith, R.W. and K.H.Lee : "A Comparison of Data from Bond Type Simulated Closed Circuit and Batch Type Grinding Tests", Trans, AIME, 241, 91-101 (1968)
- 30) Bond, F.C. : "Constant Work-Index from the Crack Length", Engr. and Min.J., 164, 108-109 (1963)
- 31) Bond, F.C. : "Confirmation of the Third Theory", Trans, AIME.Min.Eng., 217, 139-153 (1960)
- 32) 石原透 : "試験用ミルによるWork-Index 試験の結果について", 日本鉱業会誌, 80, 924-928 (1964)
- 33) 小竹直哉, 庄司ひとみ, 長谷川政裕, 神田良照 : "Work Indexに基づく砕料の微粉碎性評価", 粉体工学会誌, 31, 626-630 (1994)
- 34) 小竹直哉, 神田良照 : "粉碎仕事指数 (Work-Index) の測定条件に対する一考察", 資源と素材, 116, 901-905 (2000)
- 35) Kanda, Y., Y.Abe, T.Hosoya and Honma : "A Consideration of Ultrafine Grinding based on Experimental Result of Single Particle Crushing", Powder Technol., 58, 137-143 (1989)
- 36) Piret, E.L. : "Fundamental Aspects of Grinding", Chem. Eng.Progr., 49, 56-63 (1953)
- 37) 八嶋三郎, 神田良照, 坂本宏, 栗野修, 諸橋昭一 : "ぜい性材料のWork Indexと力学的性質との関係", 化学工学, 34, 1199-1205 (1970)
- 38) Tanaka, T. : "Work-Index Theoretically Related to Rate Function of Grinding Kinetics", J.Chem Eng.Japan, 8, 82-83 (1975)
- 39) 神田良照, 鈴木道隆 : "仕事指数の推定", 材料, 26, 850-852 (1977)

Table 1 Grinding conditions

試料	供給粒子径 (μm)	ボール質量 (kg)	試料供給質量 (g)
石英ガラス	2,000~1,700	2.0	200
石英	2,000~1,700	2.0	200
長石	1,400~1,180	2.0	200
石灰石	1,000~850	1.8	180
石膏	1,000~850	1.8	180

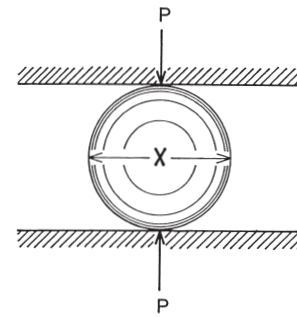


Fig. 1 Crushing of sphere

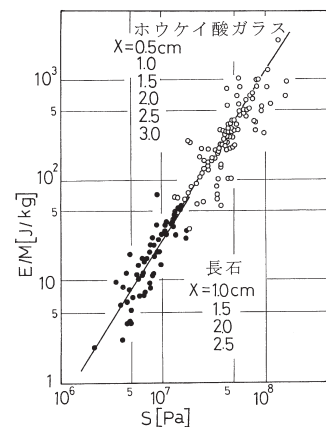


Fig. 2 Relationship between strength and specific fracture energy

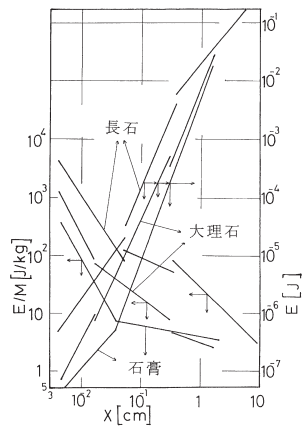


Fig. 3 Relationship between particle size and specific fracture energy or fracture energy

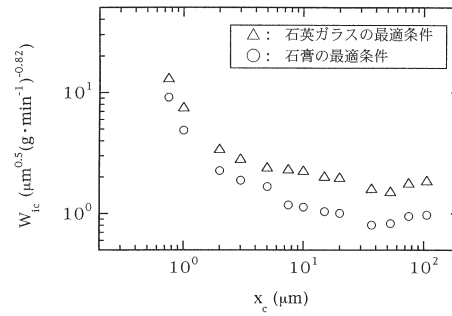


Fig. 6 Relationship between sieving size and corresponding Work Index (Gypsum)

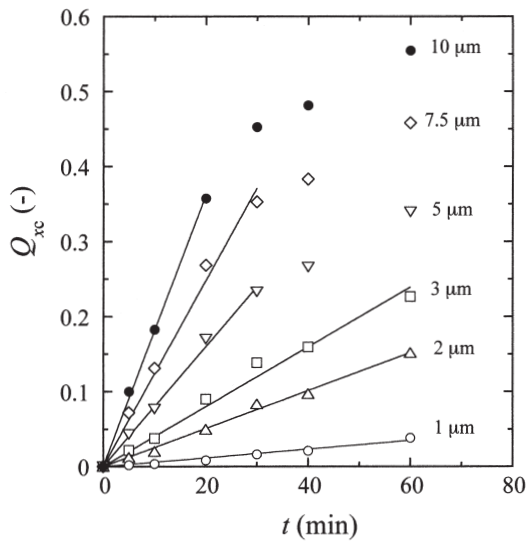


Fig. 4 Relationship between grinding time and mass fraction less than sieving size (Limestone)

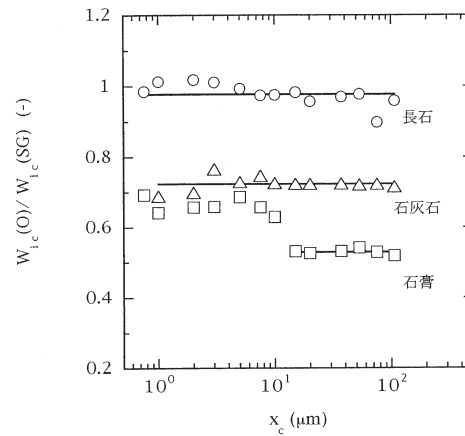


Fig. 7 Relationship between $W_{ic}(O)/W_{ic}(SG)$ and sieving size

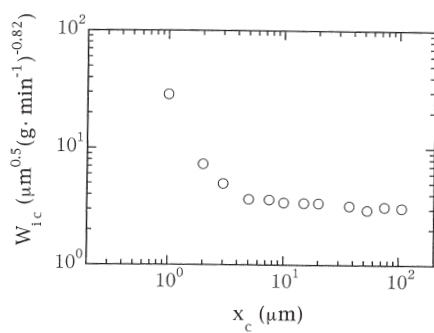


Fig. 5 Relationship between sieving size and corresponding Work Index (Silicaglass)

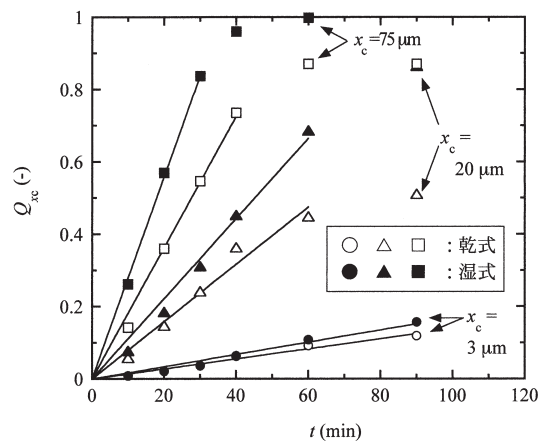


Fig. 8 Relationship between grinding time and mass fraction less than sieving size (Silica glass)

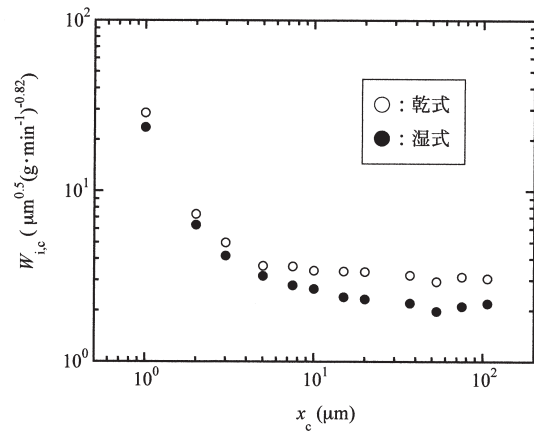


Fig.9 Relationship between sieving size and corresponding Work Index in dry and wet grinding