鉱山用大型ミルの特性*

愛 甲 秀 夫**, 鳥 羽 克 彦**

Characteristics of Large Grinding Mills for Mining Industry

Hideo AIKO and Katsuhiko TOBA

1. ま え が き

1970年から1980年代にかけてセメント用ミル, 鉱山用ミル共に, 粉碎ミルは飛躍的に大型化された。しかし, その大型化もピークに近づいた感があり1980年代にはいってやや落ち着いている。ミルの大型化は, そのメリットと共に, 市場ニーズに支えられ, ユーザーとメーカーの協力のもとに, 幾多の難問を克服し, 今日に至っているが, 鉱山用ミルは鉱山用として, セメントミルとは, かなり違った特性を備えている。

ここに, 最近の当社納入ミルを中心に, 鉱山用ミル, 特に大型サイズの粉碎性能およびハード面の特徴を今後の動向ともからめて, 御紹介したい。

2. 粉 碎 性 能

従来のロッドミルとボールミルの組合せによる2段粉碎に代わって, ボールミルのみによる一段粉碎の採用が多くなり, ボールミルは急激に大型化した。またさらにフローの簡略化を可能とする大型ミルとしてオートジナスミルがあり, この二つの機種を中心に粉碎性能を述べてみたい。

a ボールミル

ボールミルの能力は BOND 理論に基づく基本式に各種の補正係数を乗じた次式により算出する^{1),2),3)}。

$$W=10W_i\left(\frac{1}{\sqrt{P}}\cdot\frac{1}{\sqrt{F}}\right)K_1\cdot K_2\cdot K_3\cdot K_4\cdot K_5$$

但し W : 粉碎所要動力(KWh/t)

W_i : ワークインデックス (KWh/t)

F : 供給原料80%通過粒径 (μ)

P : 製品80%通過粒径 (μ)

K_1 : ミル直径係数

K_2 : 乾式粉碎係数

K_3 : 微粉碎係数

K_4 : 過大供給サイズ係数

K_5 : 開回路係数

上式自体は実験式であり, ミルを大型化した場合の信頼性に疑問が残るが, そこで鉱山用大型ボールミルの代表的なサイズである 5 m 径クラスのミルに適用した結果を表 1 に示す。

対象のミルはフィリッピン銅鉱山で稼動している一次粉粉用オーバフローボールミルである。

表 1 に示す如く BOND 式より求めた計算所要動力が実所要動力とよく合致している。

計算式中の補正係数 K_1 のミル直径係数の効果によりミル径が大きくなれば粉碎効率は良くなるとされていた。ところが直径が 5.0 m を越えると逆に効率は悪くなるとの説が1970年中頃に広まった⁴⁾。パプア・ニューギニアのブーゲンビル銅鉱山の当社納入 5.5 m 径ボールミルの運転実績を根拠としたものである。

この結果, ボールミルの大型化に急ブレーキがかかり現在では 5 m 径ミルが大型ミルの代表となっている。ブーゲンビル鉱山では最近, ミル内のスラリー濃度を調整することにより, 粉碎効率の大巾な改善に成功している。表 2 に最近のデータによる比較を示す。

以前は15~20%実動力が計算値より高くなっていたが最近のデータではよく合致している。

ブーゲンビル鉱山での実績をふまえ 5.5 m ミルが見直されつつあり, 今後 5.5 m ミルの採用は増えてゆくであろう。

b オートジナスミル

オートジナスミルの粉碎は原料中の大塊が媒体となるため, その特性次第で粉碎性能が変わってくる。このため通常のワークインデックスをベースにした計算では能力算定は不可能であり, パイロットスケールテストを必要とする。

* 昭和59年 6月13日本会第72回例会において発表,

** ㈱神戸製鋼所重機械設計部

昭和59年 4月26日受理

表1 5m 径ボールミル性能

	4.9m 径ミル	5.0m 径ミル	5.0m 径ミル
ミル サイズ	$16 \times 25 \frac{1}{2}$	$16 \frac{1}{2} \times 23 \frac{1}{2}$	$16 \frac{1}{2} \times 29$
モータ実消費動力 KW	2,468	2,467	3,404
実 粉 碎 能 力 t/h	164.5	257.2	358.8
原料粒度80%通過粒径 μ	21,336	10,822	8,379
製品粒度80%通過粒径 μ	165	178	172
ワークインデックス KWh/t	16.0	14.0	14.0
実 所 要 動 力 KWh/t	15.0	9.59	9.49
計 算 所 要 動 力 KWh/t	15.3	9.68	9.41

図1 ブーゲンビル鉱山5.5m 径ボールミル

表2 5.5m ボールミル性能

	5.5m 径ボール
ミル サイズ	$18 \times 22 \frac{1}{2}$
モータ実消費動力 KW	3,205
実 粉 碎 能 力 t/h	455
原料粒度80%通過粒径 μ	8,500
製品粒度80%通過粒径 μ	280
ワークインデックス KWh/t	13.4
実 所 要 動 力 KWh/t	7.04
計 算 所 要 動 力 KWh/t	7.07

オートジナスミルのスケールアップはパイロットテストより求めた所要動力を1:1の比で実機に適用するとされているが³⁰⁾ ミル径比で5~6倍のスケールアップに適用可能か疑問が残る。

この疑問に答えるべくチリ・ディスピクタダ銅鉱山へ納入した28×15セミオートジナスミルの運転実績とパイロットテストの比較を行なった。

鉱石60トンチリより日本へ運搬し、当社高砂工場へ設置した6×4パイロットミルでテストした。表3に実機とパイロットミルの比較を示す。

2~3%実機サイズの所要動力が小さくなっているが

図2 28×15セミオートジナスミル

ミル径の違いによる影響が出ていると思われる。

サイジングにおいてミル径の違いによる効率の上昇を原料のバラツキを吸収する安全ファクタとすれば、1:1のスケールアップはこのテスト結果からも信頼しうると考えられる。

3. ミル回転速度

適正な粉碎効果が得られる範囲で速く回し、ミル出力を上げて処理能力を増やしたいが、一方ではライナの摩耗速度が大きくなる。この相反する要因を折込み、経済的な回転速度が選定される。

近年ライナ材の高硬化化、ライナ形状の改良によりその寿命は大巾に延びている。それに応じてミル速度も増えてきている。従来、湿式5m 径ボールミルの速度はクリティカルスピードの65~70%程度とされていたが、最近では75%を越えた回転数が選定されている。前述のブーゲンビル鉱山では処理能力を増やすためピニオンの歯数を増やしたものに取替え、ミルの増速を行ってきた⁴⁾。現在まで12台のボールミルはクリティカルスピードの74

表3 オートジナスミル実機とパイロットミルとの比較

		A 鋳 石		B 鋳 石	
		パイロット 機	実 機	パイロット 機	実 機
ミ ル サ イ ズ		6×4	28×15	6×4	28×15
モータ実消費動力	KW	9.9	4,658	8.9	4,851
実 粉 砕 能 力	t/h	0.9	438	0.69	385
原料粒度 全通	mm	250	250	250	250
製品粒度80%通過粒径	μ	240	240	210	210
実 所 要 動 力	KWh/t	11.0	10.63	12.9	12.6

図3 6×4 パイロットテストミル

%以上に上げており、最も速いミルは82%で回転している。増速に見合って能力は増えており、かつライナ寿命は20ヶ月以上を確保している。

オートジナスミルについても増速化の傾向にある。南アフリカ RANDFONTEIN 金鉱山へ納入した14×24セミオートジナスはクリティカルスピードの90%で運転されている。このように南アフリカのオートジナスミルは胴体の長さを直径より大きくとり、高速で運転するのを特徴としているが⁵⁾、最近ではクリティカルスピードの90%を越え100%近くで運転するよう計画しているものもある。

一般的に鉱山ではミルの処理能力がプラント能力を決定している場合が多く、プラント運転成績向上のため、ミルの増速化は続くであろう。

4. ミル駆動方式

ミル駆動用の電動機、歯車、接手等は産業機械の中でも最も高容量な部類に属するであろう。例えば歯車減速機の大型化はミル大型化の歴史とも深くかかわっていると言える。今後のミル大型化の限界は駆動装置の設計製作の限界と同調することになる。

ここに現状の駆動方式とその将来性を述べる。

a サイドドライブ方式

リングギヤを胴体に取り付け、ミル側面よりピニオンを

介して回転する方式である。経済的なため鋳山用ミルでは最も多く採用されている。シングルドライブ方式では4500 KW～5000 KW、2ケのピニオンで駆動するツインドライブ方式では9000 KW～10000 KW が限界とされている。

駆動システムの組合せは様々であるが、代表例として次の2つが挙げられる。

i) 誘導電動機—歯車減速機駆動

一般的によく使われる駆動方式であり、サイドドライブ方式はこの組合せをベースに発展したと言える。ツインドライブ方式に採用する場合でも誘導電動機の負荷に応じスリップする特性を利用して左右の伝達バランスを自動的に調整することが可能であり、安定したツインドライブが得られる。前述のディスプタダ鉱山向28×15セミオートジナス(5200 KW)やアルゼンチン・HIPASAM 鉄鉱山向19-1/2×32 1/2 ペブルミル(5000 KW)は本方式によるツインドライブを採用している。

ii) 同期電動機—エアクラッチ駆動

力率改善が可能な同期電動機の利点が生かせる本方式が最近の大型ミルの駆動方式の主流となっている。前述のフィリピン銅鉱山向の5m 径ミル、ブーゲンビル向ミルは本方式である。またチリ・CAP 社へ納入した16-1/2×37-1/2 (4500 KW) は同期電動機—歯車減速機—エアクラッチの組合せとしている。

同期電動機—エアクラッチ駆動によるツインドライブ方式は、左右のバランス調整が困難なため実用不可能とされていたが、最近カナダのメーカにてエアクラッチの空気機構と電動機の励磁装置の調整により左右のバランス調整を行なう方式が開発され、実際に使用され始めている。

1970年代中頃から、アメリカ・カナダのミルメーカーは10m 径クラスの超大型オートジナスミルを続々と製作した。ところが1970年代後半にリングギヤ・ピニオンの損傷事故が世界各地で発生し、深刻な問題になったことがある。事故の主な原因は大型リングギヤの歯切精度を従来のミル用に適用していた等級そのままとしたためで

図4 最大加工径 15m の超大型歯切盤

ある。例えば外径 6m のギヤに対し 12m 外径のギヤのピッチ誤差は15%近く大きくなり、歯車噛合せに悪影響を及ぼす。この悪影響を十分配慮せず、従来の設計標準を踏襲して失敗しており、スケールアップの恐さを物語っている。現在、一連の事故をふまえて歯車精度の大巾な向上が要求されている。例えばピッチ誤差は AGMA 10級 (JIS 2 級相当) と大型歯車にとっては極めて厳しい要求をするエンジニアリング会社もあり、各メーカは精度向上に全力をつくしている。

b センタードライブ方式

減速装置が密閉箱にユニットととしてはいるため粉塵の多い雰囲気での運転に向いており、主にセメントミル用として使われている。サイドドライブ方式の信頼性が低かった10数年前には鉱山のミル用としても使われていたが、金銭的に高くつくため今日での採用は稀である。本方式も最近ではヨルダンセメントの 8000 KW セメントミル駆動用の遊星歯車減速機のように従来のロックドレン式の製造限界を越えたものが出てきている。

c ギヤレスドライブ

ミル胴体の外周に電動機のロータを取付け、直接ミル胴体を回転する駆動方式である。

歯車機構が無いので、運転保守が容易であり、電源周波数を可変することにより、自由にミル回転数を変えることが出来る。ミルの駆動方式としては理想に近いものである。

ロータとステータ間のエアギャップが大きく、周波数変換のための電源装置を必要とするのでエネルギー効率が悪い、また価格的に高くつく等の欠点を持っているが、歯車駆動の製作限界を越えており、超大型ミルの駆動方式として、今後採用が増えてゆくと見られる。現在のところ、世界で30数台のギヤレスミルが稼動しているが、ノルウェーの鉄鉱山で稼動しているオートジナスミル1台⁷⁾を除いてはすべてセメントミルである。当社では韓国双龍セメント社へ 6000 KW のギヤレスタイプの仕上

表4 ギヤレスミルおよびモータ仕様

ミルサイズ	5.5m ϕ ×7.8m ^L
ミル型式	湿式オーバフローボールミル
ミル回転数	13~19rpm (クリティカルスピードの70~105%相当)
モータ型式	オーバハンギング型同期電動機
モータ出力	6000 KW
極数	42
可変速方式	サイクロコンバータ周波数変換

図5 ギヤレスミル外形図

ミルを納入しているが、最近ブーゲンビル鉱山向にギヤレスタイプのボールミルを受注し現在設計製作中である。

表4にブーゲンビル向ギヤレスミルの概略仕様、図5に外形を示す。

一般的にギヤレスドライブ方式の利点として、

- (1) 歯車が不要故大型化に於ける製造面の制限が少ない。
- (2) 摩耗部品が少ない。(ミルのメタルと電動機のスリップリングのみ)
- (3) 回転数が可変であり、経済速度で運転できる。
- (4) 主電動機で寸動運転が可能であり、別な寸動装置を必要としない。
- (5) 据付面積が少なくすむ。

が挙げられる。

ブーゲンビル鉱山においては、大巾にフィード量が変わるリグラインドミル用として、可変速で運転する必要があり、安定な速度制御が得られかつ、機械的安定度が高いギヤレスドライブが採用された。

図6にギヤレスドライブ用電動機の一般的な電気系統を示す。

商用サイクルの電源から周波数変換器により約 5 Hz の電源を取り出し、電動機本体にインプットして所要のミル回転数を得ている。

図6 リングモータ電気系統図

ギャレスドライブの欠点であるエネルギー効率の悪さも、電源装置を含めた効率で、現在92~93%まで上昇してきている。価格的にも容量が大きくなる程競争力があり、今後は鉱山用ミルの分野でも、セメントミル同様にギャレスドライブの採用は増えるものと思われる。

5. 回転体支持方式

ボールや原料を含めた回転体の総重量は大型ミルでは数百トンから千トン越え、この荷重が両端2組の軸受に作用する。それ故、軸受の設計製作には細心の注意が払われている。

a) ころがり軸受

胴体の撓みに追従できるよう、自動調芯ころ軸受が使われる。

図7は前述の南アフリカ RANDFONTEIN 鉱山向14×29セミオートジナスミルの軸受部である。

図7 ころがり軸受支持

図8 すべり軸受支持

軸受部がコンパクトになり、摩擦損失が小さく、起動用高圧ポンプを必要としない等の利点があり、ヨーロッパの鉱山用ミルによく使われている。しかし軸受が2m以上の大型になると価格競争力がなくなり大型ミル用としては限界がある。

b) すべり軸受

ミル用軸受として、一般に使われているタイプである。軸受面は錫または鉛ベースのホワイトメタルを鑄込んであり構造上からも容易にスケールアップ可能である。図8に当社ミル用軸受の標準的な構造を示す。

当初ミル用として製作実績のある最大の軸受サイズは3060 mm 径×1120 mm 巾であり、片側で最大700トンの荷重を受ける。1パッド軸受としては機能的にはほぼ限界である。

当社では現在 11 m 径の世界最大級オートジナスミルを詳細設計中であるが、2パッドに周方向に分割したピボット型軸受を採用している。

c) 胴体支持方式

胴体両端のトラニオンヘッドを無くし、胴体を直接支持する方式は軸受の支点間が短くなる利点により長胴型であるセメントミルには、よく採用されている。鉱山用ミルは短胴でありセメントミル程の利点はないが北欧および南アフリカで製作しているオートジナスミル用に主に採用している。

胴体のジャーナル面の周変形に追従できるよう軸受自体は数個のパッドに分割されているので大型化に対する制限は少ない。

8000 KW 級の大型ミルになるとトラニオンヘッドの重量は鑄放しで80トンを越える。製造能力から見れば十分余裕はあるが、経済設計の面から見れば、大型化するほどトラニオンヘッド支持より胴体支持の方が有利となり、胴体支持方式の採用は今後増えてゆくであろう。

6. 機械的信頼性

ミルは大型化する程、事故発生における損害規模は急激に大きくなる。安定運転の確保のため機械的信頼性はより高度に、また機械保護用の電気計装もより信頼できるものでなければならない。

a) 応力解析

従来の強度解析手法が大型ミルにも適用可能か、スケルアップの設計段階で常々疑問となる。ミルの主要部品である胴体、トラニオンヘッド、歯車等は有限要素法にて応力解析を行なっている。計算精度の確認のため、前述のヨルダン向 8000 KW セメントミルの主要部品の応力をストレンゲージにより測定したところ計算値と測定値がよく合致した。この測定により大型ミルの応力解析に対する有限要素法の信頼性を確認することが出来た。

図9は前述の28×15ミルの有限要素法による解析結果である。

振動解析にも有限要素法は有力であり、駆動部系の振動対策に今後広く使われるであろう。

b) 非破壊検査

高精度の強度計算に基づいて設計されておりながら材料内部の有害な欠陥があっては意味がない。

内部品質は健全でなければならないが、その確認の手段として信頼性の高い非破壊検査が要求される。

トラニオンヘッドの首部は構造上常に高い応力が発生し、昔からミル部品の中で、トラブルの多い箇所である。大型になるほど内部欠陥が潜在しやすくなり内部品質の確認が問題となる。

大型トラニオンヘッドの品質確認のためブーゲンビル向に最初に製作した時1個余分に鋳込み、図10の通りヘッド首部を切り出し破壊検査を行なった。

検査に使用されたトラニオンヘッドは鋳放しで約50トンであった。この破壊検査により大型鋳鋼品の品質確認と併せて、非破壊検査による欠陥探知の信頼性を確認することが出来た。

c) 異常検知装置

大型ミルでは事故発生時のリスクが大きいため、事故防止および最小限の被害にとどめる対策として、ミル運

図9 28×15セミオートジナスミル応力分布

図10 破壊検査に使用したトラニオンヘッド首部（写真は左図の斜線部を示す。）

転中に機械的異常を早期に検出することが重要である。通常行なわれている軸受、潤滑油等の温度およびモータ電流値の監視以外に実用化され効果を挙げているものをここに紹介する。

- 1 電流監視により軸受メタルとジャーナルの金属接触検知
- 2 ジャーナルの位置測定により油膜厚み、メタルの摩耗量検出
- 3 振動測定による軸受、歯車の異常検出
- 4 赤外線温度計、ストロボ等による歯面監視
- 5 潤滑油分析による軸受、歯車の異常検出
- 6 遠心スイッチ利用によるエアクラッチのスリップ保護

異常検知の対象がトラブルの多い軸受、歯車に集中している。中でも軸受に対しての事故予防策は種々講じられており、焼付事故等のトラブルは極めて少なくなっているが歯車に対しての事故予防対策としては今一步の感があり、今後の課題である。

7. 今後の動向

鉱山用大型ミルの中心機種としてプラントフローが簡単になり、省力化等に有利なオートジナスミルが注目されている。海外における新規の大型鉱山開発では、ほとんどがオートジナス粉碎の採用を検討していると言われている。ボールミルについては、今後は2次ミルとしてオートジナスミルのバックアップとしての用途が増えるだろう。北欧の鉱山では過粉碎を嫌って2次ミルもベブルミルに代えた完全オートジナス粉碎の採用が増えている⁹⁾。

しかし乍らオートジナスミルには根本的な欠点がある。

○消費動力が他機種より高い。

○ミルサイジングにパイロットテストが必要である。

昔から使われている機械でありながら、この問題は今だに解決されていない。それだけに種々改善の余地が残っている魅力的な機種である。

また最近注目されてきた機種としてセントリヒューガルミルが挙げられる。ミル自身が大きな動力場をつくる

ため、同一重量で従来ミルの数倍から数十倍の出力を出せるのが特徴である⁹⁾。南アフリカの金鉱山のように地下数千メートルの採掘場より鉱石を地上へ持ち上げるところでは、このミルを地下採掘場に設置し粉碎製品をポンプで汲み上げる事により生産コストの低減が可能となる。地下採掘場のような狭い場所に設置可能で高出力により従来の大型ミル並の処理能力が期待できるとすれば、その適用に多くの可能性を持っており、今後のスケールアップが注目されるであろう。

8. む す び

当社納入ミルの事例を中心に鉱山向大型ミルの特徴を述べた。極めて構造簡単でありスケールアップについては一見容易に思える機械であるが様々な問題を抱えている。ミルメーカーとして今後も改善・改良を加えながら市場ニーズにあった大型ミルの製作に取り組んでゆきたい。

参 考 文 献

- 1) Bond, F. C. Third theory of comminution. Min. Engng., N. Y., 4, 1952.
- 2) Bond, F. C. Crushing and grinding calculations. Br. Chem. Engng., 6, 1960
- 3) Rowland, C. A. Comparison of Work Indices Calculated from Operation Data with those from Laboratory Test Data. IMM 10th International Mineral Processing Congress.
- 4) Steane, R. A. Selection and performance of large-diameter ball mills at Bougainville Copper, Ltd.
- 5) A. H. Mokken Progress in Run of Mine Milling as Originally Introduced and Subsequently Developed in the Gold Mines of the UNION Corporation Group.
- 6) W. F. McDermott, G. J. Lipovetz, and H. R. Peterson The Dollars & Sense of Autogenous Grinding.
- 7) Walter Meintrup and Fritz Kleiner. The World's Largest Ore Grinder without Gears.
- 8) Jan-Erik Nelleus. Autogenous Grinding at Boliden-Experience and A Case Study.
- 9) A. A. Bradley. High Speed Centrifugal Milling and its Potential in the mining Industry.