



Title	ボールミル性能に関する一実験
Author(s)	林, 香織; 斎藤, 武
Citation	北海道大學工學部研究報告, 16, 105-112
Issue Date	1957-06-05
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/40607
Type	bulletin (article)
File Information	16_105-112.pdf



[Instructions for use](#)

ボールミル性能に関する一実験

林 香 織
齋 藤 武
(昭和 32 年 2 月 28 日 受理)

One Aspect of the Performances of a Ball Mill

Kaori HAYASHI
Takeshi SAITO

Abstract

The effect of a speed and a ball charge of the ball mill upon a capacity and power requirement was investigated experimentally. The results were as follows:

(1) At any speed below the critical speed, the torque was proportional to the ball charge, and was the maximum when the ball charge occupied about 45% of the mill volume.

(2) The torque was the maximum at the speed of about 45% of the critical speed and had no relation to the ball charge.

(3) The crushing capacity increased proportionally to the ball charge up to about 50% of the mill volume and was a maximum at about 65% of the critical speed. The maximum power requirement was found to be at about 85% of the critical speed.

目 次

1. はし が き	1
2. 模 型 ボールミルと石炭試料	2
3. ミル内のボールの飛動状況	2
4. 回転力と回転数, 装入ボール量の関係	4
5. 粉 碎 能 力	5
6. 消 費 動 力	7
7. む す び	8

1. はし が き

ボールミルは工業上用途極めて広く, その性能に関しても, 既に例えば A. E. Gow¹⁾, F. C. Bond²⁾, H. E. Rose³⁾ など国内, 外数多くの理論的または実験的研究が報告されている。

しかし, ボールミル性能に影響を及ぼす諸因子は, 例えば, ミル形状寸法, 回転数, 装入ボールの大きさと量, 粉碎原料の粒度, グラインダビリティ, 附着水分などがあり, これらを考

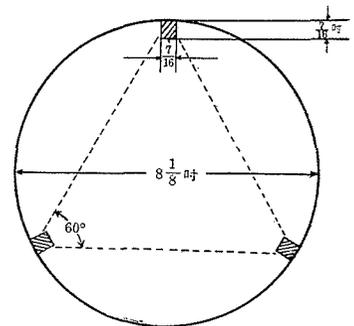
慮し、理論的な解析を行なうことは、甚だ困難な点が多く、なお、条件の異なる数多くの実験に俟たねばならぬことが寡くない。

筆者らは偶々石炭のグライндаビリティに関する研究を行い、その測定法自体の検討を行なう必要から、模型ボールミルについて、特に粉碎性能に関する諸因子中、回転数、装入ボール量、消費動力、粉碎能力などの相互関係につき石炭を試料として二三の実験を行なったのでその結果を報告する。

2. 模型ボールミルと石炭試料

供試のボールミルには、石炭グライндаビリティ（ボールミル法）測定用に ASTM 暫定規格により制定された寸法に従い作製したものをそのまま用いた。すなわち、第1図に示すように内径 $8\frac{1}{8}$ 吋、長さ 8 吋の円筒で、内部に 120° 間隔に $\frac{7}{16}$ 吋角リフター 3 箇を設けてある。これを変速モーターにより任意の回転数に調整して、途中自記記録しうるような自製の回転力計を経て駆動しうるとくした。

装入ボールには、夫々 $1, \frac{3}{8}, \frac{1}{2}$ 吋の鋼球を用い、試料には北海道炭礦汽船清水沢並粉、発熱量（高位）6700 kcal/kg、グライндаビリティ指数（ハードグローブ）59 のものを用いた。これをボールミル法によるグライндаビリティ測定の際の試料作成と同様にして、まず気乾状態のものをブラウン横型粉碎機により全部 16 メツシュ（タイラー）篩を通過せしめるよう粉碎し、次に 200 メツシュ篩で篩分けし、200 メツシュ篩止りのものを試料とした。



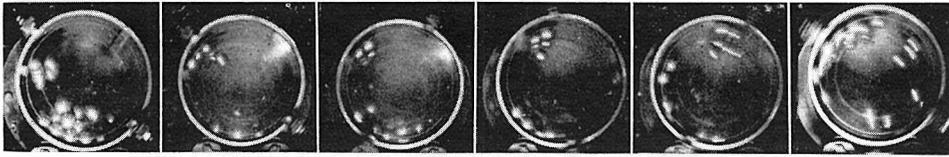
第1図 ミル断面

3. ミル内のボールの飛動状況

ミル内のボールの運動を直接観察するため、ミル片面に内部を透視することのできるようにアクリライト合成樹脂板をもつて蓋をし、ボールのみを装入するようにし、回転数、装入ボール量を変え写真撮影を行なった。装入ボール数は 40, 80, 100, 120, 160, 200 箇であり、回転数は毎分 25, 40, 60, 80, 100, 120 回転である。この場合のボールはすべて 1 吋鋼球を用いている。

ミルが回転をはじめると、装入ボールは内壁およびボール相互間の摩擦力で壁面に沿うてある高さまで引上げられる。ボールが受ける円周速度は遠心力を生じ、これによりボールは一層内壁に押付けられるが、ボールがある高さに達すると重力の作用がこれにうち勝つてくずれ落ちる。写真中 25, 40 r.p.m. はこの状態を示しており、この間の粉碎は専ら圧縮と剪断の力によることとなる。回転数が増加すると引上げられる高さも次第に高くなつて、壁面を離れたボールは抛物線を画いて落下するようになる（写真中 60, 80 r.p.m.）。この場合の粉碎にはボー

装入ボール数 40 箇



25 r.p.m.

40

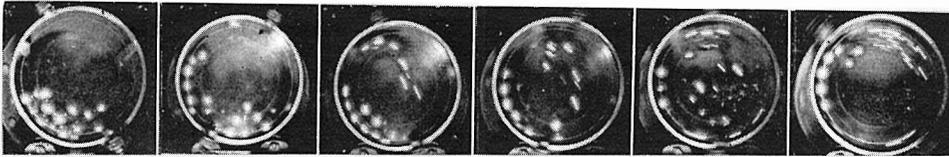
60

80

100

120

ボール数 80 箇



25 r.p.m.

40

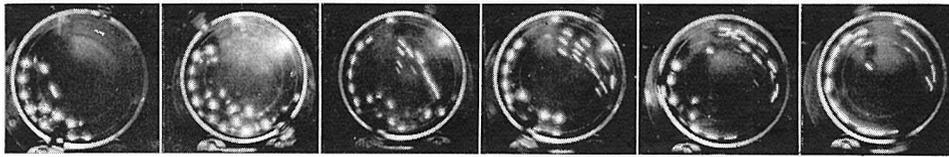
60

80

100

120

ボール数 100 箇



25 r.p.m.

40

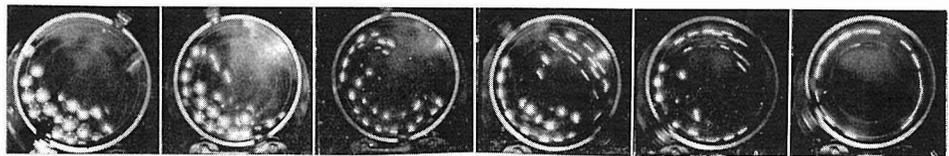
60

80

100

120

ボール数 120 箇



25 r.p.m.

40

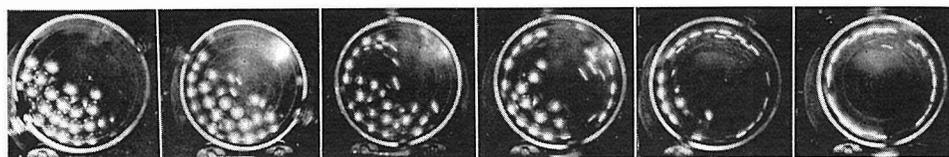
60

80

100

120

ボール数 160 箇



25 r.p.m.

40

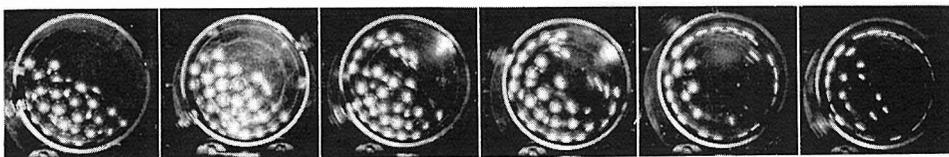
60

80

100

120

ボール数 200 箇



25 r.p.m.

40

60

80

100

120

ミル内のボールの飛動状況

ルの衝撃力が新たに加わることになる。更に回転数が増加すると、遠心力が重力にうち勝つてボールはミル内壁に密着し一体となつて回転し粉碎能力としては激減する(写真中 100, 120 r.p.m.)。一般にこのようにボールの遠心力が重力と釣合つたときの理論速度を臨界速度 (Critical speed) n_c [r.p.m.] と云い、ミル内径 D [m] に比しボール径の無視できるときは、次式で示される。

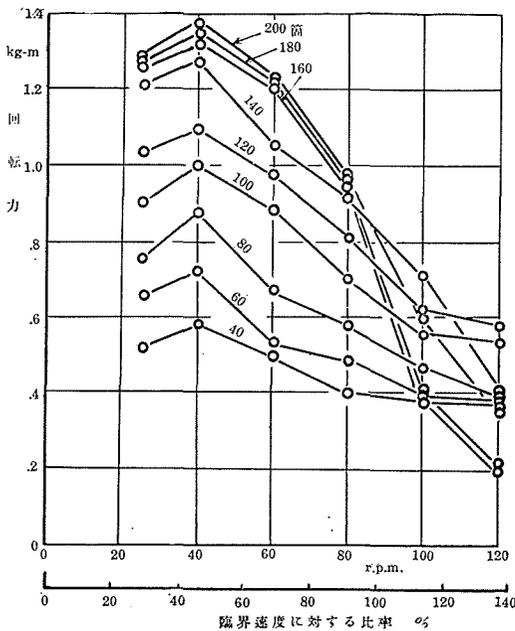
$$n_c = 42.3/\sqrt{D}$$

当模型ミルでは $D=0.229$ m 故 $n_c=88$ r.p.m. となる。ミル内壁が平滑のときは、ボールは内壁に対し滑りを生ずるので、重力と釣合つて円運動をする回転数は滑り分だけ増加するが、当ミルでは3箇のリフターがあるため、内壁に密着ボールは一体となり回転し滑りは生じない。

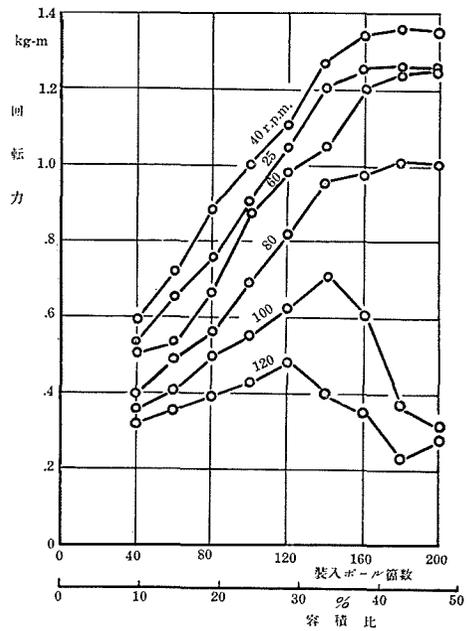
ボールがくずれ落ちずに、壁面から離れて飛び出す回転数は、臨界速度の約 60% 付近である。装入ボール量の少ないときは、回転数が増加し臨界速度以上になつても、ボールがミル内壁の一部より満し得ず、ミルは偏心荷重で振り廻されることとなり動的に不釣合になる。このため円周速度も一定とならずボールが不規則に飛動落下する(写真中 120 r.p.m. で装入ボール数 40 80, 100 箇の場合)。ミルの容積比、ミル容積に対する装入ボールの見掛容積の比、が 25% (装入ボール箇数がこの場合約 100 箇) 以下のときこのような現象を呈し、これ以上ではボールはミルと一体となり回転し、安定した状態を示すことになる。

4. 回転力と回転数、装入ボール量の関係

ミルの回転数および装入ボール量により、ボールの飛動状況は前掲写真のように異なるが

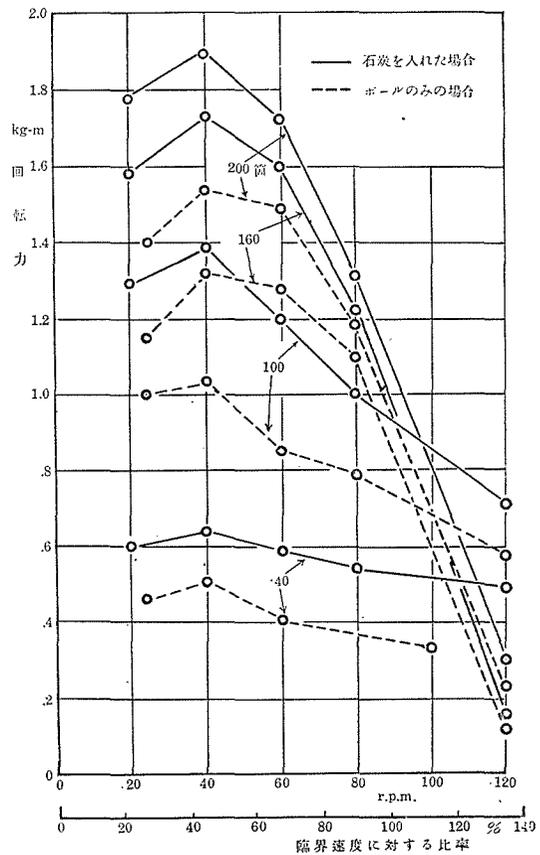


第2図 回転力と回転数の関係



第3図 回転力と装入ボール量の関係

同時に回転力も変化する。自記回転力計により求められた回転力と回転数、装入ボール量との関係を求め図示すると第2図のようになる。同一装入ボール量についてみると回転力をはじめ回転数の増加と共に漸増し、臨界速度に対する比率が45%で最大値を示し、それ以上では急激に減少を示す。装入ボール量の多いものほど回転力は大となるが、横軸に装入ボール量、すなわち容積比をとり図示すると第3図のようになる。その傾向は回転数の大小により相違するが、装入ボール量換言せば容積比にほぼ直線的に比例して増加するが、臨界速度以下のときは容積比凡そ45%で最大値を示す。H. F. Rose³⁾の実験ではこの最大値は40%であると云い略一致する。臨界速度以上では最大値を示す容積比は小となり本実験ミルにおいて、装入ボールが丁度ミル内壁に一様に分配される容積比25%以上となると、同一回転でもミル回転は安定し、回転力は急激に低下することになる。



第4図 石炭を入れた場合の回転力

つぎに、前記の試料500 grをミル内に加えて前同様の実験を繰返した。第4図はその結果を示す。試料を挿入した場合、ボール相互間あるいはボールとミル内壁の間の摩擦力は増加しまたボール表面を滑り落ちるボールに対する抵抗が大となつて、同じ回転数でも引き上げられるボールの高度が大となり回転力は平滑なボールのみの場合に比し大きな値を示すこととなる。回転力の増加割合は容積比の小さいものほど大となり、60 r. p. m. のときを例にとれば、容積比45%のとき16%増であるのが、容積比25%では約40%増となることを示している。また、容積比30%を越える範囲では回転数の大きくなるほど増加割合は減少する。このようなボール間の摩擦力の影響についてはA. H. Gow¹⁾らがボールの中に少量の砂を混ぜて行つた実験があるが、同様に容積比の小さいほど回転力の増加割合は大で容積比30%の場合の回転力の増加割合は約12%となつている。

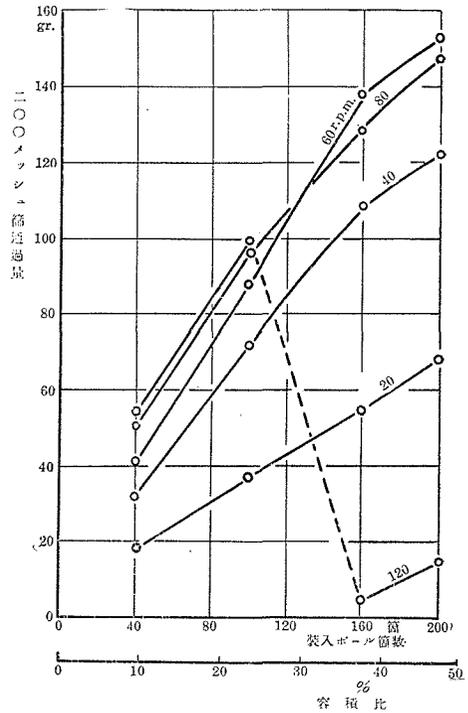
5. 粉碎能力

試料500 grをミル内に入れ、夫々の回転数で各6分間運転粉碎し、200メツシュ篩で篩分

けし、その通過量をもって粉砕能力比較の基準とした。第5図はこのようにして求めた粉砕能力と装入ボール量の関係を示す。臨界速度以下では粉砕能力は装入ボール量にほぼ比例して増加する。回転数が高く臨界速度以上になると、ボールがミル内壁に一様に分配される箇數、すなわち容積比約25%に至るまではボールはミル壁に沿いながら前後に移動することになり粉砕能力は増加するが、それ以上になればボールはミルと一体となり回転するのみなので粉砕能力は激減する。毎分回転数が増加すれば、当然一定時間内の延回転数が増すことになるが、その割合に粉砕能力は上らず60 r.p.m. 臨界速度に対する比率65%以上の回転数増加は無意味となる。同一回転数当りの粉砕能力から云えばむしろ低速回転の場合の方が有利である。

つぎに、直径の異なる3種のボールを混合

しその混合割合が粉砕能力に及ぼす影響につき実験した。すなわち、1. $\frac{3}{4}$ 吋ボールを用い

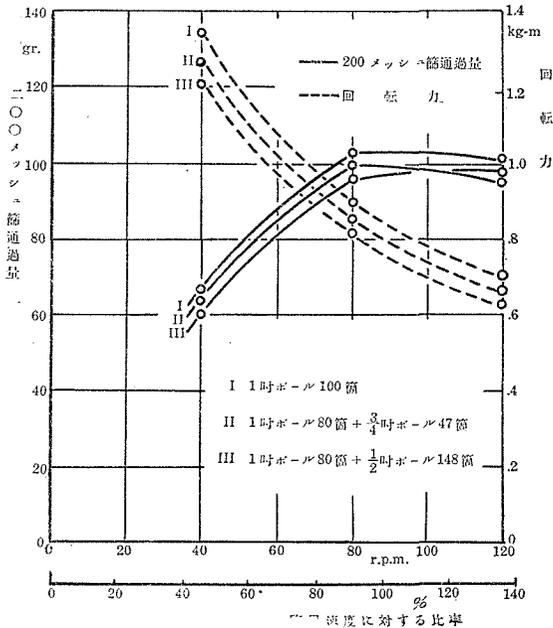


第5図 粉砕能力と回転数，装入ボール量の関係

全重量がすべて同一になるように

- (1) 1吋ボールのみ100箇，
- (2) 1吋ボール80箇と $\frac{3}{4}$ 吋ボール47箇，
- (3) 1吋ボール80箇と $\frac{1}{2}$ 吋148箇，

の3つの場合につき回転数を夫々変えて比較を行なつた。第6図はその結果を示す。実験の結果は同一重量であつても小径ボールを混入した場合の方が粉砕能力は増加する傾向を示した。実ボールミルにおいては装入ボールは摩耗により次第に径は小さくなり、次々に新しいボールを補給することにより大小さまざまなボールが混在するが、微粉砕にはこのように小径ボールを多く混入して、ボールの表面積を増し、またボール相互間に相対



第6図 装入ボールの大きさが粉砕能力に及ぼす影響

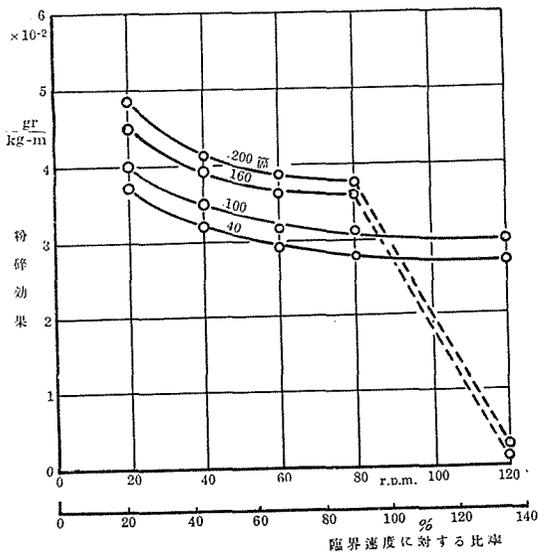
的に不規則な運動をせしむることが粉砕能力を増す上に有利であると考えられる。

6. 消費動力

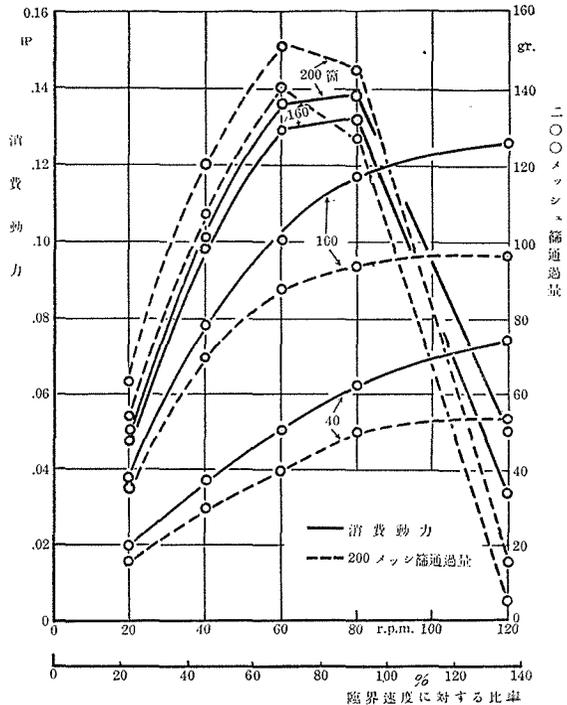
消費動力は前述の回転力と回転数との積として求められる。この回転数および容積比の消費動力に対する関係は第7図のように示される。また、同図中に第6図に示した粉砕能力を比較のため書き加える。

ボールミルの消費動力については従来すでに数多くの算定式が発表されているが、一般に回転数および装入ボールの容積比にはほぼ直線的に比例すると云われている。第7図および回転力の関係を示す第2,3,4図などでも明らかなように、この関係は実際のボ

ールミル使用の現況のような比較的低速な回転で容積比もあまり大でない範囲では成立つことが本実験によつても確められた。すなわち消費動力は回転数の上昇と共に低速回転のうちにはほ



第8図 粉砕効果



第7図 消費動力、粉砕能力とミル回転数、装入ボール量の関係

ぼ直線的に増加する。しかし、回転力が臨界速度に対する比率45%附近で最大値を示し、それ以上で減少することに対応して消費動力としては同比率が凡そ85%附近で最大となり、これ以上では反つて低下することを示している。

装入ボール量に対する、消費動力の傾向は第4図に示す回転力曲線と同様になる。臨界速度以下では本実験範囲のボールの容積比50%程度までは消費動力は容積比に直線的に比例すると看做しうる。

これらの消費動力と粉砕能力との関連を検討すると、第7図より明らかなように消費動力最大の状態が必ずしも粉砕能力最

大とはならず、同一装入ボール量の場合粉砕能力最大の回転数は消費動力最大の回転数より低いところで現われる。ボール数の少ないときは消費動力、粉砕能力共に最大値は回転数のより大きなところで現われている。

故に単位消費動力当りの200メッシュ篩通過量を粉砕効果として求めると、夫々回転数およびボール容積比に対する関係が第8図のように求められる。すなわち、粉砕効果はむしろ回転数の低いときほど良好な結果を示している。

7. む す び

ボールミルの性能に関し模型実験を行い、ミル内のボールの飛動状況を観察し、ミルの回転力と回転数、装入ボール量の関係、また粉砕能力と消費動力の関係等につき実測を行い、以下のごとき結果を得た。

1. 回転力は装入ボール量はほぼ直線的に比例増加し、臨界速度以下では容積比約45%で最大となる。また、臨界速度の約45%の回転数で装入ボール量に関せず最大値を示す。
2. 粉砕能力は臨界速度以下では容積比約50%迄は装入ボール量に直線的に比例し増加する。
3. ミル回転数が上ると、粉砕能力も消費動力も共に増加するが、粉砕能力は臨界速度の約65%のとき、また消費動力は約85%のとき最大となる。
4. 単位消費動力当りの粉砕能力は回転数の低いほど大きい傾向を示す。

本実験遂行については、終始北大工学部熱機関研究室諸君の協力を得た、特に装置の作製計測には田中辰雄君の尽力に負うところが多い、厚く謝意を表す。

文 献

- 1) A. E. Gow: Trans. AIME Vol. 87, p. 87, 1930.
- 2) F. C. Bond: Trans. AIME Vol. 153, p. 373, 1943.
- 3) H. E. Rose: The Chartered Mechanical Engineer Vol. 3, p. 78, 1956.