浮選における分散気ほうのサイズ分布について

——浮選における気ほう負荷の研究 (第2報)——

正 会 員 八 嶋 三 郎*

On the Size Distribution of Flotation Bubbles

——Study on the bubble loads in froth flotation-2——

Saburo YASHIMA

As the continuation¹⁾ of the previous report the author experimentally studied flotation bubbles by using experimental apparatus illustrated by Fig. 1 and obtained the following results.

(1) Shapes and sizes of bubbles obtained by photographic method under various frother concentration of T. F. No. 5 and MIBC are shown in Fig. 2 and 3.

(2) As illustrated by Fig. 4 mean diameter of bubbles, apparent specific gravity of pulp and volume of air drew into flotation machine gradually decrease with the increase of frother concentration. While, mean retention time of bubbles in flotation cell gradually increase with the decrease of bubble size.

(3) As shown in Fig. 5 depth of pulp have only little effect on size and shape of bubbles.

(4) Number and total surface of bubbles increase suddenly with the increase of frother concentration, these relations being illustrated by Fig. 6.

Notations

C ; frother concentration in mg, N_b ; number of measured bubbles, D ; diameter of bubble in mm, $\bar{D}$; mean diameter of bubbles in mm, $\bar{\alpha}$; mean dimension ratio of bubbles, ρ ; apparent specific gravity, t ; mean stay time of bubbles in flotation cell in sec, V ; air volume drew into flotation machine in l/min, h ; depth of pulp in cm, n_1 ; number of bubbles produced in unit time in 1/sec, A_1 ; total surface of bubbles produced in unit time in cm²/sec, n_2 ; number of bubbles continuously contained in unit volume of pulp in 1/l, A_2 ; total surface of bubbles continuously contained in unit volume of pulp in cm²/l.

1. ま え が き

著者は第1報¹⁾において気ほう表面に接着した鉱粒の配列を大球の表面における小球の配列と考へて、気ほう表面における鉱粒の最密充てんに関する研究結果について述べ、1個の分散気ほうがその表面に接着しうる鉱粒数には限界があることを明らかにした。この関係を用いると、与えられた浮選系において考へうる最大浮鉱量を求め、これと実際の浮鉱量の関係から気ほう負荷、および気ほうの利用率を検討することができるわけであるがその基礎実験として浮選槽内における分散気ほうのサイズ分布と相境界面面積²⁾などを求めてみた。以下にその結果について報告する。

2. 実 験 装 置

実験装置は第1図のようである。図の(a)は装置の全体を示す側面図、(b)は気ほう撮影装置、(c)は気ほうセルである。気ほうの撮影についてはFahrenwald³⁾は

浮選槽中に液を満たしたビュレットを倒立させてその中を上昇する気ほうを撮影し、Whelan⁴⁾およびFuerstenau⁵⁾は浮選槽あるいは気ほうが上昇するセル外から高速度撮影機で写し、Gründer⁶⁾およびBennett⁷⁾らは浮選槽内に気ほうが通過するスリットを有する光学系を沈めて高速度撮影機で撮影し、林⁸⁾はフラッシュランプを用いてガラス張り浮選槽外から撮影し、Sutherland⁹⁾はフラッシュランプによる撮影およびアーケランプの照射による高速度撮影を行なった。著者はこれらのうちFahrenwald、林およびSutherlandの方法を併用して撮影を行なった。図の①は容量3lのDenver型浮選試験機で、インペラの直径80mm、実験は回転数1,740rpm、周速度435m/minで行なった。②は浮選機の電動機で200watt、③はスタンドパイプの空気吸込口で、パイプ④で空気流量計に接続してある。スタンドパイプの上部はインペラの回転軸と気密になっている。⑤はガラス製気ほうセルで、図(b)のようにこ

* 昭和38年4月15日受理

** 工博 東北大学助教授 工学部鉱山工学科

a) 井上は文献5)の摘録²³⁾において“相境界面面積”としたのでこれにしたがつた。

第1図 実験装置

の中を上昇する気ほうを顕微鏡⑧を通して写真機⑨で撮影する。光源には⑦のストロボを用いた。発光時間は1m secであり、⑩は光を導く中空円筒である。

(c)は気ほうセルの先端部で気ほうの停滞を防ぐためナイフエッジとした。気ほうセルはスタンドパイプと浮選槽側面との中央に挿入しセル先端が液面から槽底までの深さの中央に開口するように固定した。気ほうセルは内面空間の幅が2, 4, 6 mmのものを準備し、気ほうサイズに応じて使い分けた。水の場合と起ほう剤濃度が低く気ほうサイズの粗大な場合には顕微鏡を通して撮影することは困難なので液面でストロボを発生させ、浮選槽側面のガラス窓を通じて気ほうを接写した。気ほうの撮影と併行して浮選機吸込空気量を測定し、必要に応じて浮選機を密閉し吸込、排出空気量の測定を行なった。起ほう剤には高砂浮鉱油 T.F. No. 5 と MIBC を使用した。

3. 実験結果

第2図は気ほう写真の数例を示したもので、倍率およ

- b) 主として NIKON F を、フィルムは A.S.A. 200 のものを用いた。
 c) 部屋を暗くして撮影したが、ストロボを用いる場合には完全な暗室でなくとも十分な撮影ができた。
 d) KAKO S 2 型を使用した。
 e) この方法では丁度レンズの焦点深度の部分の気ほうのみがはっきり写ることになるので各起ほう剤濃度につき多数の写真撮影して後述のサイズ分布を求めた。

第2図 気ほうの写真

び起ほう剤濃度 c を付記した。(a), (b) は水のみ分散気ほうと液面におけるほうまつ層を示す写真、(c)~(h) は T.F. No. 5 をそれぞれの濃度で添加したときの気ほう、(i) は MIBC を添加したときの気ほうの写真である。(j), (k), (l) は、T.F. No. 5 を用いてそれぞれ石炭、硫化鉄鉱および方鉛鉱の浮選を行なったときの気ほうに鉱粒が接着した様子を捕えたもので参考までに掲げた。

3.1 気ほうの形状

水の場合の気ほうは粗大で形状も不規則であるが起ほう剤が加えられると形状は球に近づき、気ほうが安定して来るのが認められた。気ほうの最大径と最小径の比をとりこれを寸法比 α とすると、水の場合には平均寸法比 $\bar{\alpha}=1.2$ であるのが、T.F. No. 5 の濃度 $c=$

6.7mg/l では $\bar{\alpha}=1.1$, $c=13.5\text{mg/l}$ 以上では $\alpha=1.0$ と濃度の増加とともに球に近づいて来る。これらの気ほう寸法比は Whelan ら⁹⁾ の求めた結果と一致した傾向を示している。

3.2 気ほうのサイズ分布と気ほうサイズの起ほう剤濃度による変化

種々の起ほう剤濃度で気ほうのサイズ分布を調べた結果は第3図のようである。図において c は前述のように起ほう剤濃度, n_b は数えた気ほうの数, 横軸の D は気ほうの直径⁹⁾, $\bar{D}$ は平均直径, $\bar{\alpha}$ は平均寸法比, 縦軸の f は頻度でパーセントで示した。起ほう剤濃度の増大とともに次第にサイズが減少する傾向が見られるがこの関係は第4図をみればさらに明らかである。図は横軸に c ,

D : 気ほう直径, f : 頻度, c : 起ほう剤濃度, n_b : 数えた気ほうの数, $\bar{D}$: 気ほうの平均直径, $\bar{\alpha}$: 気ほうの平均寸法比

第3図 気ほうのサイズ分布

縦軸に $\bar{D}$ と分散系の比重 ρ ⁹⁾, 分散気ほうの槽内平均滞留時間 t ¹¹⁾, および単位時間当たり吸込空気量 V をとつたものであるが, 曲線 $\bar{D}$ をみると T.F. No.5 でも MIBC でも $\bar{D}$ は c の増大とともにはじめ急激に減少するが, c 約 20mg/l でほぼ一定値に達しそれ以上 c が増大しても $\bar{D}$ の減少はきわめて緩慢となる。Fahrenwald¹⁰⁾, Gründer¹¹⁾ Sutherland¹²⁾ らも主としてパイン油を使用して気ほうサイズの測定を行なっているが, この中起ほう剤濃度による気ほうサイズの変化を調べた最近の研究として Bennett ら¹³⁾ が求めた⁹⁾ c による $\bar{D}$ の変化を合わせて示すと図のようになり, 本測定と同じ傾向を示していることがわかる。

3.3 液面よりの深さによる気ほうサイズの変化

次に液面よりの深さによる気ほう直径と寸法比の変化を調べてみると第5図のようになる。図は水の場合と起ほう剤濃度 $c=6.7\text{mg/l}$ の場合について分散系を 0.43cm ずつ36層に区切り各層ごとの $\bar{D}$ と $\bar{\alpha}$ を示したものである。液面からの深さ h による気ほうサイズの変化は $h=8.6\text{cm}$ 付近まではほとんど認められず一定であるが, インペラの位置に接近するにつれて $\bar{D}$ が小となり, $\bar{\alpha}$ が若干大となる傾向が認められ, この付近では激しいかくはん作用のため気ほうが押しつぶされ, ゆがめ

$\bar{D}$: 平均気ほうサイズ, c : 起ほう剤濃度, t : 浮選槽内平均気ほう滞留時間, V : 吸込空気量, ρ : 分散系比重

第4図 起ほう剤濃度と気ほうサイズ, 分散系比重, 浮選槽内平均気ほう滞留時間, 吸入空気量の関係

f) 第3図において水の場合など不規則な形状の気ほうの分布は気ほうの最大直径と最小直径との算術平均 D_1 をもって各気ほうの代表寸法として示したヒストグラムである。かかる気ほうの平均直径 $\bar{D}$ を求めるには, 不規則形状気ほうの形が一般に回転楕円体とみなしうるので上述のヒストグラムから代表寸法 D_1 の加重平均値 $\bar{D}$ を求め, これと平均寸法比 $\bar{\alpha}$ とから, 気ほうを回転楕円体と見なしたときの体積を算出し, これと同体積を有する球の直径を求めて気ほうの平均直径 $\bar{D}$ とした。

g) 分散系を特殊比重ビンに一定量吸出して測定した。

h) 分散系の比重 ρ から槽内に常時滞留する空気量を求めこれと単位時間当たり吸込空気量とから算出した。

i) Bennett らが求めた気ほうサイズ分布を示すヒストグラムから平均直径 $\bar{D}$ を算出して c との関係を示した。

h : 液面からの深さ, $\bar{D}$: 気ほうの平均直径, $\bar{\alpha}$: 気ほうの平均寸法比, c : 起ほう剤濃度

第5図 液面からの深さによる気ほうの変化

られて十分には生長しえない様子がうかがえる。しかしこのような現象も起ほう剤濃度が低く、サイズの大きい気ほうの場合にのみ顕著に認められるものであり、起ほう剤濃度が高くなり、気ほうサイズが小となるにつれて浮選槽内における気ほうの滞留時間が長くなり、気ほうの分散が均一となるので、深さによる影響は全く見られなくなるように観察された。なお図および写真には示さなかつたが、T.F. No. 5 に K. A. X を用いた結果は Grönder¹⁴⁾ の結果と同様ザンセートの添加により気ほうはさらに細かくなることが認められた。

3.4 分散系の見掛比重と気ほうの滞留時間

次に分散系の比重測定を行なった結果は第4図の曲線 ρ のようであつて、これも起ほう剤濃度と関係があり、濃度が増大するとはじめ急に減少するが、それ以後はこの傾向が緩慢となる。図の曲線 t は比重測定結果から求めた槽内での平均気ほう滞留時間であつて、気ほうサイズが粗大な場合には気ほう数が少なく、また個々の気ほうの浮力が大であるため上昇速度が速く、したがつて槽内の滞留時間も短い、気ほうサイズが小さくなると槽内滞留時間も長くなる。これは気ほうの細粒化にしたがつて浮力が小となり、一方槽内には中心部スタンドパイプの付近には激しい下降流が、また壁面には上昇流があつて、気ほう群はこの激しい渦流にまき込まれ、流れの静かな部分へと脱出して液面に到達することができるまで、比較的長時間槽内にとどまるようになるものと考え

n_2 : 浮選槽内に存在する気ほう数、分散系 1/l 当たり, n_1 : 単位時間当たり発生気ほう数, A_2 : 浮選槽内の気ほう表面積分散数 1/l 当たり, A_1 : 単位時間当たり発生する気ほう表面積, a : 気ほう 1 個当たり表面積, v : 気ほう 1 個当たり体積, c : 起ほう剤濃度

第6図 起ほう剤濃度と発生気ほう数、気ほう表面積など

られる。なお比重 ρ は槽内の気ほうの分散がはなはだしく不均一となる $c=13\text{mg/l}$ 以下の濃度では分散系の見掛比重として正確に求めることが困難となるので測定結果を点線で示した。浮選機の吸込空気量と起ほう剤濃度の関係は第4図の曲線 V のようで全般的には Worbel¹⁵⁾ の研究と同様起ほう剤濃度の増大にともなつて気ほうが細粒化するにしたがつて減少する傾向を示しているが、起ほう剤濃度の低い範囲で最大値を示し、以後漸減する傾向は林¹⁶⁾ の測定結果と一致している。また図には示さなかつたが電動機入力による変化も Worbel¹⁷⁾、林¹⁸⁾ の研究結果と同様起ほう剤濃度の増大とともにわずかではあるが減少する傾向にあり、起ほう剤の添加によつてパルプの被破砕性が增大するように認められた。

3.5 浮選槽内に単位時間当たり発生する気ほう個数と相境界面面積

j) 槽内にゴムの細かい粒子を投入し、あるいは槽内に細く短い毛糸の一端をはりつけてその動きによつて観察した。

次に浮選機を密閉して吸込空気量と排出空気量の測定^{k)}を行ない、これらが等しい値を示すことを確認した後浮選機を常態にもどし、浮選槽内に発生する気ほうの数と相境界面積を気ほうの平均体積と吸込空気量を用いて Gründerら¹⁹⁾ および Bennett ら²⁰⁾ と同様の方法で求めてみた。その結果は第6図に示すようである。横軸は c 、縦軸の a は気ほう1個の平均表面積、 v はその平均体積、 n_1 は単位時間に発生する気ほう数、 A_1 は単位時間に発生する相境界面積、 n_2, A_2 はそれぞれ常時浮選槽内に存在する分散系1*l*当たりの気ほう数およびその相境界面積である。これらの結果をみると c の増大にともなつて気ほうサイズが減少するにしたがい、 n_1, n_2, A_1, A_2 ともにはじめ急激に増大するが、気ほうサイズが一定値に近づくともこれらも一定となり、一例として起ほう剤濃度 $c=50.6\text{mg/l}$ で、気ほうの平均直径 $\bar{D}=0.22\text{mm}$ の場合、 $n_1=4.83\times 10^4/\text{sec}$ 、 $A_1=7,550\text{cm}^2/\text{sec}$ 、 $n_2=15.2\times 10^4/\text{l}$ 、 $A_2=23,700\text{cm}^2/\text{l}$ となり、非常に膨大な数の気ほうと相境界面積が生じていることがわかる。なお n_2 と A_2 については Gründer ら²¹⁾ がバイン油を用いて測定した結果よりも一般に大きい値となっているが、これは彼らの測定した気ほうサイズが、同一 c において比較すると著者の値よりも大きい値を示していることに主たる原因があるものと思われる。

4. む す び

以上第1報にひきつづき浮選槽内における分散気ほうのサイズとその分布を求め、これから気ほう形状、気ほうサイズの起ほう剤濃度による変化、液面からの深度に

k) 溶存空気の影響を調べる目的で行なつた。

よる気ほうサイズの変化、分散系の見掛け比重と気ほうの滞留時間、槽内に発生する気ほう数と相境界面積などを調べ、これらの結果を従来の測定結果と比較した。気ほうの写真測定については従来の研究結果よりも明瞭な撮影を行なうことができたように思う。これらの結果を用い、浮選試験における実際の気ほう負荷を検討した実験結果については次報に述べる予定である。

本研究を遂行するに当たり、ご指導をいただいた大山正先生、ならびにご助言を賜つた下飯坂潤三教授に深く謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 大山正・八嶋三郎：日鉱誌，77巻，872号，昭和36年2月，94～100ページ
- 2) A. F. Fahrenwald: E.M.J., Vol. 146, No. 10, Oct., 1945, pp. 94～95, 155～156.
- 3) P. F. Whelan & D. J. Brown: Bull. Inst. Min. Met., Vol. 65, No. 591, Feb., 1956, pp. 181～192.
- 4) D. W. Fuerstenau & C. H. Wayman: Min. Engng. Vol. 10, No. 6, June, 1958, pp. 694～699.
- 5) W. Gründer, W. Siemes u. J. F. Kauffmann: Erzmetall, Band IX, Heft 12, Dez., 1956, S. 559～608.
- 6) A. J. R. Bennett, W. R. Chapman & C. C. Dell: Studies in Froth Flotation of Coal, 第3回国際選炭会議における論文，June, 1958, Brnssels Liege.
- 7) 林大輔：日鉱誌，73巻，823号，昭和32年1月，21～26ページ
- 8) K. L. Sutherland: J. Phys. Chem. Vol. 52, pp. 394～425.
- 9) 前出3)，10)前出2)，11)前出5)，12)前出8)，13)前出6)，14)前出5)。
- 15) S. A. Worbel: Mine & Quarry Engng. Sept., 1953, pp. 314～319.
- 16) 林大輔：日鉱誌，78巻，893号，昭和37年11月，809～816ページ
- 17) 前出15)。
- 18) 林大輔：日鉱誌，73巻，829号，昭和32年7月
- 19) 前出5)，20)前出6)，21)前出5)。
- 22) 井上外志雄：日鉱誌，74巻，835号，昭和33年1月50～53ページ，[5)の摘録]。

新 著 紹 介

Rock-forming Minerals Vol. 1～5

1962～1963 Longmans

W. A. Deer, R. A. Howie and J. Zussman 著

鉱物の基本的な分類が結晶構造にあることは近年の常識である。この著書では、従来よく用いられていた元素鉱物、酸化鉱物、硫化鉱物等々の分類を採らず、先ず、地殻を形作っている最も重要な鉱物の示す結晶構造の基本形によつて 1. Ortho-and Ring Silicates, 2. Chain Silicates, 3. Sheet Silicates, 4. Framework Silicates. の4大別にしたがつて各冊を設け、Silicate 以外のさまざまな結晶構造を持つものを

5. Non-Silicates として第5冊目に取纏めてある点に一つの特徴がある。この反面、しかし、造岩鉱物に重点が置かれているため、Non-Silicate minerals にさいてある紙数は比較的少なく、例えば、鉍石鉱物として重要な硫化鉍物では、黄鉄鉍、磁硫鉄鉍、黄銅鉍、方鉛鉍、閃亜鉛鉍を掲げるに留まっている。この著書の目的はこれで充分であり、またこれ以上求むべきではない。鉍物各項の記載は結晶形態の簡単な記

載、物理性などの表記的記載を冒頭に、結晶構造の基本的な記述と問題点の要約、温度圧力条件の変化に対応する相平衡(固溶体、多形の問題を含む)物理性とくに光学的性質、鑑定上の特徴、岩石中(鉍石も含む)における他の鉍物との共生関係の順になされている。最も力点がおかれているのは、相平衡と共生関係であるが、鉍物結晶の結晶構造の微かな差異に至るまでの理解と、天然の岩石や鉍石中における鉍物の産状の理解とは、これらのことがらをさし措いてはあり得ないことを思えば力点をここにおいた本書の勝れた意図がわかるであろう。著者は何れも世界的な著名な学者であり、最近の文献まで選択よろしきを得て引用してある。(岩生)

各冊 300～400 ページ
¥4,000～6,000