鉬石の浮選特性を評価するための 新しい方法*

高 森 隆 勝**
深 見 進***

New Method for Evaluation of the Flotation Characteristics of Ore.

Takakatsu TAKAMORI
Susumu FUKAMI

Understanding flotation characteristics of ore and quantitatively expressing it were most likely impossible.

The authors tried to settle these questions and a new method is proposed in this paper. The method consists of flotation test under the conditions set up and the analysis for the results of the flotation test.

A plot of the logarithm of the proportion of residual constituent in pulp against flotation time yields the specific curve of a constituent in ore [Fig 1 curve (1)].

The specific curve [(1) Fig 1] is separated into two or more straight lines (2) and (3) in Fig 1] by graphical analysis.

These straight lines show that the slope is the flotation rate constant " k " and the value at zero minute in flotation time is the proportion " ξ " of the element indicated with the flotation rate. Therefore, in Fig 1, a constituent consists of two elements ξ_1 , k_1 and ξ_2 , k_2 .

The results of the analyses of six flotation tests which were done at each mine and the data of the flotation operation are shown in Fig 2 to Fig 7.

In each case, the results of analyses conform to the data in operation.

The new method proposed in this paper made it possible to evaluate quantitatively the flotation characteristics of an ore.

(† Faculty of Engineering, Hokkaido University)

(†† Toyoha Mine, Nippon Mining Co.)

鉬物の種類・品位，単体分離粒度，可溶性塩の種類・量など鉬石自体の性質についての研究は必ず行なわれ，それに基づいて，その鉬石の性質の把握が行なわれている。しかし，これら鉬石自身の性質を十分理解した上で鉬石の浮選における特性を客観的に把握し，他の鉬石のそれと比較するための尺度は現在のところはない。

昨秋行なわれた第43回浮選研究会例会の検討会のために各鉬山に依頼すべき資料の選択とその取り括めを行なうに際して，筆者らは，鉬石の浮選特性を客観的に把握

するための方法について，種々検討を行なった。その結果例会検討会資料第2表に示した条件にて浮選試験を行ない，その結果を資料第1図～第7図に示されているようにグラフ化して，鉬石相互の浮選特性の相違を客観的に把握することを試みた。すなわち，これは，鉬石に含まれている各有用成分の浮選速度の状態を検べることを意味し，それにより，鉬石相互の浮選特性を比較しようとするものである。しかし，この実験結果を数値により，定量的に表わすならば，さらにその比較を有効なものとなすことができるであろう。そこで，ある鉬石に含まれている有用成分について，浮選速度定数の測定とその速度定数をもつものの量割合を調べ，その関係をグラフ上に表示することによって，鉬石の浮選特性を理解し，鉬

受理 昭和45年2月12日

* 第3回浮選研究会例会検討会において一部発表を行なった。

** 北海道大学工学部教授工博

*** 日本鉬業株式会社豊羽鉬業所選鉬課長

石相互の浮選特性を、定量的に比較することが可能となるであろう。

本報告は、鉱石の浮選特性を定量的に表わすことにより、その鉱石の浮選処理についての示唆を得るため、かつ、鉱石相互の定量的比較を可能ならしめるための標準が必要であることに鑑み、その具体的方法を提起しようとするものである。また、併せて第43回例会検討会に提出されたデータを本方法により解析した結果を報告するものである。

I. 浮選試験の条件および方法

筆者らが提案する浮選試験の条件および方法は、第43回例会検討会資料を提出願った6鉱山に依頼したときのものと同じであり、つぎの通りである。

1. 供試々料

ロッド・ミルまたはボール・ミル給鉱24時間平均のものを、-10 mesh に粉砕したもの。（-10 mesh 産物の粒度分布および品位の測定）

2. 用 水

蒸留水を使用する。

3. 摩 鉱 条 件

湿式摩鉱：パルプ濃度 50%

摩鉱産物粒度：-200 mesh 60%（摩鉱時間の測定および摩鉱産物の粒度分布および品位の測定）

4. 浮 選 条 件

(1) 給 鉱 量 1,000g

(2) 浮選試験機 京大式FG浮選機

(3) パルプ濃度 40% ± 2%

(4) 浮選 pH は自然 pH とする。（浮選前後の pH の測定）

(5) 試 薬

起泡剤 日香 #125 45g/t

捕収剤 協和 NaEX 100g/t

(6) 条件付与時間 3分

(7) 浮選時間 10分間とし、浮選開始時より1分間毎にフロスを採取する。

(8) 浮選前後のパルプ濃度の測定

本浮選試験に使用する鉱石は、その選鉱工場において処理せられている鉱石を代表するものでなければならぬ故、そのサンプリングには慎重を期されなければならない。そこで、24時間の平均試料を用いることとした。長期にわたりサンプリングを行ない、平均化することは、一般論としては良いが、その場合には、鉱石酸化などの問題を生じ、質的变化を来す恐れがある。また、サンプリングしたときの鉱石は、いずれの鉱床また切羽からのものであるかを、採鉱と密接な連絡をとって調べ、代表的鉱石であることを明らかにしておく必要がある。

検討会資料作成のための試薬は、各山へ同一のものを各メーカーより送付願ったものである。鉱石の浮選特性比較のためには、このように配慮も必要と考えられる。

II. 浮選試験の結果

第43回例会検討会資料として6鉱山において実施された試験結果は、同資料第1図～第7図（本誌36頁～38頁）に示されている。

これらの結果を見ても、それぞれの鉱石について浮選の特性を理解し、また比較するための貴重なデータであることがわかる。すなわち、有要成分の浮遊性の良否、分離性の難易など浮選挙動の基本的性質を把握し、比較する上で誠に有効なものである。しかし、これら実験結果を解析し、鉱石の浮選特性を数量化し、定量的に把握することができれば、さらに便利である。つぎに、浮選試験結果の解析方法などについて述べることにする。

III. 浮選速度の解析

1. 浮選速度解析の基礎

今泉・井上両氏* は、「着目粒子群に属する1粒子が、任意の単位時間内に浮く確率が一定であり、それが他の粒子の存在とは無関係に浮遊するならば、時間 t から $t+dt$ の間に浮く粒子の数 dN は、その時にパルプ体内に残っている着目粒子の数 N と dt との積に比例するはずである。

すなわち、

$$-\frac{dN}{dt} = kN \dots\dots\dots(1)$$

k : 定数

積分して、初期条件 ($t=0, N=N_0$) を代入すれば、

$$\frac{N}{N_0} = e^{-kt} \dots\dots\dots(2)$$

この式は、化学反応速度論における1次反応の式と同形である。」と述べ、これに基づいて、つぎの浮選速度関数を導いている。

$$Y = \sum_i \xi_i e^{-k_i t} \dots\dots\dots(3)$$

$$\xi_i \geq 0, \sum_i \xi_i = 1$$

ここに、

Y : 時間 t においてパルプ内に残っている着目粒子の重量割合（残分）

ξ_i : 時間 $t=0$ においてパルプ内に存在する浮選速度定数 k_i の粒子群の、対象粒子群に対する重量割合、

k_i : 浮選速度定数

である。

* 今泉, 井上「速度過程としての浮選の研究」日本鉱業会誌 77 987頁 (1961)

上述のことを平易に述べるならば、つぎのように言い得るであろう。浮選フィード中の対象粒子群（例えば方鉛鉱粒子群）は、浮選速度論的には均一なものではなく、浮選速度定数 k_i について考えれば、 i 種類の異なる浮選速度定数 k_i をもつ粒子群から構成されているものである。また、この各粒子群の浮選速度は1次式で表わされる。これに基づいて、浮選試験結果を解析し得る。

今泉・井上両氏の研究においては、種々の要因に分けて浮選速度定数を求める操作が行なわれている。これは、理論的な前提条件に従うものである。

筆者らは、現象論的に浮選速度定数を求めるものであり、化学反応速度論においてしばしば見られる Macrokinetics あるいは、見かけの速度定数に相当するものを取扱うこととする。

2. 解析方法

浮選試験を行ない、1分毎にフロスを採取し、各フロスおよび最終尾鉱の乾重量および、目的成分の分析を行ない、フィード中の目的成分の全量をそれぞれ1としたとき、各時間ごとにパルプ中に残っている目的成分の割合、すなわち、残分の割合を計算する。

つぎに1例を示す。各時間ごとパルプ内に残っている有用成分の割合の測定結果は第1表のようであったとする。

第1表 目的成分の残分と時間の関係（一例）

時 間	残分（割合）
0	1
1	0.621
2	0.412
3	0.311
4	0.249
5	0.209
6	0.191
7	0.158
8	0.141
9	0.130
10	0.118

第1表の値を片対数方眼紙上に打点したものが、第1図(1)の曲線である。

つぎに、この曲線の解析を行なう方法について述べる。この解析には、つぎの二つの条件が基となる。すなわち、

(a) 浮選フィードに含まれている一つの鉱物種においても、浮選速度の大なるものもあり、浮選速度の大なるものは、早期にフロスとして回収され、ある時間経過すると、浮選速度の遅いもののみがパルプ中に残ることとなるであろう。

第1図 解析の仕方

(b) 化学反応速度論における1次反応と同じ取扱いがされるのであるから、一定の浮選速度をもつものの残分 Y の対数 $\log Y$ と時間 t との関係は直線となる。

この(a), (b)二つの条件を考へ、第1図の曲線(1)を見ると、浮選時間が十分に経過した8分、9分、10分の点は直線上にある。この3点を結び延長した直線(3)は浮選速度の遅いグループの浮選挙動を示すものと考えられる。つぎに、曲線(1)と曲線(3)との各時間における差をグラフ上に打点し、これを結ぶと、直線(2)が得られる。この直線(2)は浮選速度が大であるグループの浮選挙動を示すものである。もしも、第1図直線(2)に相当するものが、なお、曲線を示すならば、再び同様の操作を繰り返すことによって、何本かの直線に直すことができる。

つぎに、この直線の勾配より、浮選速度定数 k_i を求めることができる。ただし、自然対数として取扱う必要がある。

次に ξ_i の値は、各直線が $t=0$ の縦軸と交わる点の値から、ただちに求められる。

すなわち、第1図に示すように、

$$Y_1 = Y_2 + Y_3$$

であり、

$$Y_2 = \xi_2 e^{-k_2 t} \quad Y_3 = \xi_3 e^{-k_3 t}$$

である。

故に、

$$Y_1 = \xi_2 e^{-k_2 t} + \xi_3 e^{-k_3 t} = 0.7 e^{-0.704 t} + 0.3 e^{-0.0942 t}$$

となる。

換言すれば、この浮選給鉱中A成分は、浮選速度定数0.704のもの70%と、浮選速度定数0.0942のもの30%よ

第2図 大峰選鉱工場

り構成されているということになる。

IV. 浮選特性試験結果の解析と考察

前節に説明したようにして、6 鉱山の試験結果を解析し、各有用成分ごとに、浮選速度定数 k と、その浮選速度定数を示すものの構成割合 ξ を求め、各鉱山ごとに、それぞれの値を片対数方眼紙上に打点したものが、第2図より第7図に示されている。

これら浮選特性試験の解析結果を示したグラフとともに、操業浮選系統の骨格、主な浮選試薬、各系統ごとの産物重量 $W(\%)$ 、各有用成分の分布率を併せ記入した。

以下これらと比較し、浮選特性試験結果の示すところを考察することにする。

第2図は、大峰鉱業所のものである。浮選速度定数 k と、その速度定数をもつものの構成割合 ξ について検討する。Au, Ag, Cu, Sp とともに、約95%程度のものは大きい浮選速度定数のものであり、かつそれぞれの速度定数は近似した値を示している。すなわち、これらのものは、ほぼ同一の浮選挙動を示すと考えられる。故に、単一浮選において、良好な結果が期待される。同所の成

給鉱品位	給鉱—Cu 浮選—尾鉱
Au : 0.8g/t	pH 9.5
Ag : 8 "	KAX
Cu : 0.68%	W : 3.16%
Sp : 0.61 "	Au : 82.4 "
Fe : 6.25 "	Ag : 82.1 "
	Cu : 93.0 "
	Fe : 45.5 "
	S : 78.5 "

績を見ると、浮選操業における pH は 9.5 であり、試験では pH 7.95~7.55 であった。すなわち、高 pH により Sp の抑制が行なわれ、その結果、Au, Ag の実収率がやや低下の傾向を示しているのではないかと考えられる。

第3図は神岡鉱業所鹿間選鉱工場のものである。 k と

第3図 鹿間選鉱工場

給鉱品位	給鉱—Pb・Zn・Gr バルク浮選—尾鉱
Ag : 23g/t	pH 10.1, 硫酸銅, NaEX,
Cu : 0.03%	青化フロート, ソーダ灰
Pb : 0.26 "	W : 6.6%
Zn : 3.7 "	Ag : 91.8 "
S : 2.0 "	Pb : 86.6 "
	Zn : 96.9 "

第4図 対州選鉱工場

給鉱品位 Ag : 159g/t Cu : 0.1% Pb : 7.46%
Zn : 11.62% S : 7.32%

給鉱—Pb 浮選—Cu・Pb 浮選—Zn 浮選—Sp 浮選—尾鉱			
pH 7.5	pH 7.6	pH 10.7	pH 10
NaHSO ₃	NaHSO ₃	石灰	NaCN
ZnSO ₄	マーカット	CuSO ₄	KAX
NaCN	KAX	NaCN	W : 12.57%
KAX	NaEX		Ag : 2.2%
W : 10.25%	W : 21.7%		Cu : 0.6%
Ag : 88.4%	Ag : 8.5%		Pb : 0.3%
Cu : 56.8%	Cu : 14.9%		Zn : 0.6%
Pb : 98.0%	Pb : 1.6%		S : 44.1%
Zn : 3.6%	Zn : 95.5%		

ξ の関係を見ると、浮選速度の大きいところに、82~83% の Pb および Ag があり、Zn は約 8%, Sp 約 14% と少ない。一方、残りの Zn と Sp の浮選速度は遅い。これらのことを特性試験結果は示している。

これらの性質から、鹿間選鉱工場において、長い間、直接優先浮選が採用されていたことが肯かれるのである。また、Ag は Pb とその浮選挙動が非常に類似していることを知る。

第4図は、対州鉱業所のものである。 k と ξ の関係を見ると、浮選速度の大きいグループの Pb, Ag, Cu, Sp, Zn は、ほぼ同じ浮選速度定数を示しており、Pb の約 93% Ag の約 85%, Cu の約 79% は、このグループに属している。実操業におけるユニットセルのフロスと Cu-Pb 浮選フロスを合した成績を見ると、Pb は 98.0%, Ag 88.4% であり、浮選特性試験結果の値と比較すると、浮選速度の大なるグループのものの量と比較的良好一致を示している。しかし、実操業における実収率がそれぞれ高い値を示しているのは、ユニットセル使用の効果によるとも考えられる。第4図グラフにおける浮選速度の大なるグループの Sp と Zn は、それぞれ約 42% と約 20% の値を示している。この適切な抑制が必要であることが示されている。実操業のデータを見ると、NaHSO₃, ZnSO₄, NaCN の抑制剤と、捕収剤として、マーカット (#404 相当の試薬), KAX を用い、ユニット・セルによる Pb 浮選に続いて Cu・Pb 浮選が行なわれている。このプロセスで回収される Zn と Sp は、それぞれ Zn 3.6%, Sp 18% であり、浮選特性のデータよりすると、抑制を必要とされている Zn と Sp が抑制され得た状態を把握し得るのである。

第5図は細倉鉱業所のものである。同図グラフにおいて、浮選速度が大でかつ、その構成割合の大きいものは、Au, Cu, Pb, Sp である。この鉱石の特徴としては、浮選速度の大きい Sp と Zn が多いこと、Ag は3段階の浮選速度を有するものから構成されており、か

つ、浮選速度の大きいものの割合が比較的少ないことである。実操業においては、Pb 浮選において NaCN, ケブラチョ C, 消石灰を用いて Zn, Sp を抑制し、#404 と IPX で浮選が行なわれており、Pb 精鉱中への Zn, Sp の回収率がそれぞれ 2.2%, 3.7% である。これより、試薬が鉱石に適合し、比較的素直に抑制せられていることを示していると考えられる。一方 Pb は、試験結果の約 98% に対して約 90% であること、および浮選速度の大きい Ag は約 63% に対して、Pb 精鉱中への Ag の回収率は、58.9% である。すなわち、浮選速度が大きい Pb の Pb 精鉱への回収率と、浮選速度の大きい Ag の Pb 精鉱への回収率はほぼ等しく、Pb の損失と同じ割合で Ag の損失を生じたことを示している。

浮選速度中位の Ag が約 29% であるのに対し、操業結果は、Zn・Sp 精鉱への銀の回収率が、27.9% であり、両者が類似した値を示している。

第6図は、豊羽鉱業所の場合を示したものである。 k と ξ の関係を見ると、浮選速度の大きな部分と小の部分に、それぞれ Ag, Pb, Sp が二つのグループに分かれてあるように見受けられ、その浮遊性における複雑さを示していると考えられる。いま第6図に書かれたフロシートにおける第1バルク浮選と Sp 浮選の両精鉱を合

鉱石の浮選特性を評価するための新しい方法

第5図 細倉選鉱工場 (上図)

給鉱品位 Ag : 28g/t Cu : 0.05% Pb : 1.26%
Zn : 4.63% Sp : 7.83%

給鉱—Pb浮選—Zn・Sp浮選—尾鉱

pH 7.3 pH 7.3

NaCN CuSO₄

ケブラチヨC IPX

消石灰

404

IPX

W : 2.3% W : 22.7%

Ag : 58.9% Ag : 27.9%

Cu : 56.5% —

Pb : 89.5% Pb : 5.0%

Zn : 2.2% Zn : 94.4%

S : 3.7% S : 83.2%

して考えると浮選速度の大なる Pb の構成割合が約90%
に対して, Pb の回収率は92.9% (第1バルクへの回収
率は90.5%), Ag は約73%に対して74%, Sp は約67%
に対して, 65.8%とそれぞれ両者の間で良い一致を示し
ている。また, Zn は約83%に対して, 45.6%であり,
これは, この浮選系統において併用せられている SO₂,

第6図 豊羽選鉱工場 (下図)

給鉱品位

給鉱—第1バルク浮選—

Ag : 135 g/t

pH 6.2

Pb : 3.31%

SO₂

Zn : 6.65%

ZnSO₄

Sp : 12.23%

ケブラチヨ

NaEX

35

W : 20.1%

Ag : 63.4%

Pb : 90.5%

Zn : 41.1%

S : 63.4%

Sp浮選—Zn浮選—第2バルク浮選—尾鉱

pH 6.2

pH 7.5

pH 7.1

NaEX

CuSO₄

KAX

NaCN

NaEX

223

NaEX

W : 5%

W : 5.5%

W : 4.3%

Ag : 10.6%

Ag : 6.8%

Ag : 6.8%

Pb : 2.4%

Pb : 1.0%

Pb : 3.1%

Zn : 4.5%

Zn : 44.1%

Zn : 8.5%

S : 10.6%

S : 12.6%

S : 12.7%

ZnSO₄, ケブラチヨなどの抑制効果を示すものと考えられる。Zn 浮選において回収される Zn は 44.1%であり前述の系統での回収率45.6%を加えると、89.7%となり、浮選速度が大なる Zn の割合が83%であるから、浮選速度が小なるグループに属する Zn の浮きにくさを示すものであろう。また、浮選速度の小なるグループに属する Ag の約50%弱はフロスとなり得ず、他の約半量がそれぞれ2分割されて、Zn 浮選および第2バルク浮選のそれぞれの精鉱中に回収されていることを示している。一般に、このグループに属するものの浮遊性の悪いことは、操業においても示されている。

第7図は、松峰選鉱工場のものである。この結果について、ボール・ミル給鉱粒度が粗であったので、浮選給鉱中に粗粒の鉱物があり、浮選試験の給鉱としては適当でなかった旨の報告を受けているので、この結果は、考察から除外すべきものとする。なお、同図に示した浮選成績の数字中、Sp 浮選への給鉱には、セミバルク精鉱を処理した産物の一部が合せられているため、Sp 浮選浮鉱への各成分の回収率には、セミバルク精鉱へのそれぞれの回収率の一部が重複していることを付記する。

V. 結 論

今日までに、選鉱の技術水準は飛躍的に向上したが、各選鉱工場で処理している鉱石の浮選における性質を客観的に評価し、鉱石相互の性質を比較するための具体的方法はない。そのため、鉱石相互の比較においても、また、その浮選工程の選択においても、主観的なものがそれを左右していた割合の大であったことは否めないであろう。

本論文においては、鉱石の浮選特性を客観的に把握し、鉱石相互の浮選の性質を比較し得るものとなすために、具体的な試験方法を提案し、その結果の表示の仕方、その解析法と解析結果の表示の仕方および、その解釈の

第7図 松峰選鉱工場

給鉱品位

Cu : 3.42%

Pb : 0.55%

Zn : 2.28%

Sp : 33.39%

給鉱—セミバルクA—セミバルクB—Sp浮選—尾鉱

pH 12.8

消石灰

CuSO₄

KHX

NaEX

pH 4.8

H₂SO₄

NaEX

W : 17.5%

Cu : 83.7%

Pb : 67.8%

Zn : 56.8%

Sp : 10.3%

W : 14.1%

Cu : 12.5%

Pb : 25.0%

Zn : 38.0%

Sp : 14.7%

W : 59.8%

Cu : 5.9%

Pb : 6.2%

Zn : 3.4%

Sp : 89.9%

実例について述べられた。

本方法によって得られた解析結果は、高い技術水準において行なわれている操業結果と良く一致した値が得られることが明らかにせられた。また浮選工程における鉱物の浮選挙動は、その浮選特性に従っているように理解される。言うまでもなく、この浮選特性についての試験・解析とともに、鉱石の鉱物学的、化学的および物理的諸性質の研究は欠く可からざるものである。

VI. 謝 辞

浮選特性試験は煩雑な仕事であります、それを遂行し、第43回浮選研究会検討会資料として提出下さいました各鉱業所の各位に厚く御礼申し上げます。また、浮選剤を御提供下さいました日本香料KKおよび、協和醗酵KKの各位、および、何回もの討議の機会を与えて下さいました日本鉱業株式会社、豊羽鉱業所所長公莊惟成氏に深謝申し上げます。