インペラによる気泡の破碎*

正 会 員 林 大 輔**

浜 崎 美 智 子***

Studies on Comminution of Air Bubbles by the Impeller

Daisuke HAYASHI and Michiko HAMAZAKI

The comminutive function for the open-air bubbles on the impeller of Fahrenwald flotator is considered due to the hydraulic action of the pulp stream and the frother is said to be effective against the coalescence of reproduced air bubbles, but the comminuting strength and reduction ratio of air bubbles are not yet known and the details of the effect of frothers are still unknown.

From this point of view the author made experimental studies on the above items by making use of the vertical type flowing channel consisted of cylindrical tubes, through the application of single air bubbles to water flow in the apparatus, and he obtained the following results:—

- 1) The relationship of the equivalent diameter $\bar{d}$ mm of single air bubbles with the critical circling velocity $\bar{U}_c$ cm/sec of the impeller comminuting air bubbles can be represented by $\bar{U}_c = K/\bar{d}^m$, where K and m stand for coefficients.
- 2) The ratio R of the diameter of the reproduced bubble to the original bubble can be represented by the following formula:

$$R = \bar{d}^{-0.500} - (2430 - 123\bar{d})(U - U_c)^{0.794} \cdot 10^{-6}$$
, where $U > U_c$,
 with a given circling velocity of the impeller.
- 3) The form of the bubble will not only influence on the degree of comminuting strength, but will vary the size of the reproduced air bubbles.
- 4) Along with the increase of the frother, the comminuting strength of the bubbles with the same diameter will be lowered (though the lowering rate is small) and simultaneously the size of the reproduced air bubbles will become smaller.
- 5) Accordingly high efficiency of the impeller as a pump will not essentially be great in comminutive function for air bubbles.

1. 結 言

林によつてすでに報告されている¹⁾、気泡の破碎と成長に関する実験的観測の結果は、すべて群粒気泡を対象として実施しているので、詳細でない欠点がある。したがつて、被破碎気泡の原粒度とこの気泡の破碎に必要な水力作用の強度との関係、原粒度と再生粒度との関係などについて、定量的に不明であるばかりでなく、起泡剤の添加と被破碎気泡の強度との関係や、再生粒度との関係についても、なお明確でないものがある。

本研究は、以上のような不明または明確でない事項を詳細にするとともに、あわせてインペラの気泡破碎作用とポンプ作用との関連を改めて検討することを目的としたものであり、小型の立型回流水槽を選び、その立管中にしかけたかい型羽根のインペラに単気泡を発泡する方法を採用して、気泡の粒度と形状を終始明らかにするよ

うに努めたものである。

2. 実験の装置と方法

装置：第1図に示すような立型の回流円管路を基本としている。 G_1 , G_2 は内径55mmの円筒ガラス管である。 G_1 中には可変速の電動機によつて回転される外周径50mm、羽根厚さ2mmで羽根幅、羽根角度、羽根数の違うかい型羽根のインペラが装置され、旋回流を阻止して気泡が管軸中心に集合して併合成長することを防止するために邪魔板BPを設けてある。 G_2 中には水銀の移動によつて外気を一定速度で押し出す毛細管CTと、この気泡の所要の滴数を受け、まとめて所要体積の単一気泡として G_1 管中に発泡するための転覆式のカップBDを置いてある。Oは管内を循環流動する液量を計測するためのオリフィスである。

気泡のインペラ破碎周速：インペラを50rpm間隔で増速し、それぞれの回転数の場合について2~8mmの等価直径に相当する体積をもつ気泡を各10滴づつカップBPを転覆して発泡して、上昇流をつくっているイン

* 昭和37年8月22日受理 日本鉱業会昭和35年度春・秋季大会にて報告したものの一部

** 工博 秋田大学教授 鉱山学部

*** 鹿児島大学助手 工学部

第 1 図

ペラにかける。このようにすると、気泡の大小、回転数の高低、気泡のインペラにかかる場所などの違いによって、インペラにかかってから 1sec 以内に破碎される気泡の状態は第 2 図に示されるようになる。

ここで(ハ)図の状態は、同一粒度の気泡でもインペラの回転数が高まるにしたがつてその破碎される度合いが順次かわるので、その間に区切りをつけることが困難であるが、(ロ)図と(ハ)図の間には気泡の破碎される状態が相当に違うので、10回転前後の誤差で大きづばな限界がつけられる。

このような区別にしたがって、それぞれの状態を無破碎通過、分割式粗破碎、細破碎として分類し、それぞれの粒度について各様式のもの発生頻度と軸回転数との関係を求めると第 3 図に示されるようになる。このようにして求めた頻度曲線から、それぞれの等価直径の気泡が 10 回とも通過する最高の回転数 n_p 、粗破碎される最低の回転数 n_s 、細破碎される最低の回転数 n_c などの見当がつけられるので、この回転数の付近で改めて 10 回づつ精査する。

このようにして確定した回転数をそれぞれ限界値としてインペラの周速を求め、限界周速 U_p , U_s , U_c として気泡の相対的破碎強度を比較する値とした。

第 2 図

第 3 図—イ

第 3 図—ロ

気泡の等価直径：別個の水槽を設け、 G_2 に挿入した CT と同一のものを挿入して、化学天秤を利用し²⁾、発泡する気泡の体積を測定しておき、この体積に滴数を乗じたものをもって BP から発泡される気泡の体積とした。等価直径は気泡を完全球形と仮定して求めた。

再生気泡の粒度： G_1 を方形の水槽で囲み、ストロボ照明を利用して再生気泡を 6 回づつ撮影し、その最大粒度のものをを選び、長・短軸長から等価直径を算出した。この場合再生気泡として測定の対象としたのは、インペラ羽根の上端域にあるもののみを選んだ。

原気泡の長・短軸長と上昇速度： G_1 中のインペラを撤去し、この中を上昇する原気泡について、ストロボを利用して連続写真を撮り、フィルムを拡大して各粒度の気泡について長・短軸長 $a \times b$ と、その上昇速度を測定した。

ポンプ作用による排液速度：オリフィスに現われた液量を基礎として算定した G_1 中の平均垂直上昇速度をもつて比較値とした。

3. 気泡の等価直径と限界破碎周速

羽根幅 10mm, 羽根数 2~6 枚, ピッチ角 45° のインペラについて、気泡体積 V と限界破碎回転数 n_p , n_s , n_c との関係を求めると第 4 図に示されるようになる。

この図には n_s の値の大部分を省略しているが、 $n_p \sim n_c$ 曲線はそれぞれほぼ平行であり、傾向からみて、等価直径 d と限界回転数との関係として書きかえると、多少の無理がある(後述)が、それぞれ 1 本の対数曲線としてまとめられるように推察される。

第 4 図に示される数値のほかに、幅 10mm, 羽根数 6 枚ではあるがピッチ角が 30°, 70°, 90° と違っているものにたいする測定値を加えて、 $\log d$ と $\log(1/n_c) \times 10^4$ との関係としてみると、第 5 図に示されるようになる。この図で、上部の 3 本の点線について測定時間 t が示されている。これらの点線から測定時間が違えば、羽根をまわる局所的な循環流にしたがつて繰り返し破碎をうける回数かわるので、関係曲線の傾斜が違ってくること

がわかる。ただし、 n_p と n_s についてはこのような変化はみられない。

この第5図に示される結果から、つぎのようなことが認められる。

1) 気泡の等価直径 d mm とインペラの限界周速 U_c m/sec(n_c から計算した値) とは、近似的に $U_c = K/d^m$ の関係式として示される。ここで K と m は第1表のA欄に示すような値である。

2) m の値には、羽根数とピッチ角によって不同が示されているが、この不同値の間には格別の傾向は認められないので、測定誤差の範囲で平均値に統一して $m = 0.311$ とし、表のB欄のように K を修正し、この値に基づいて羽根数 B 、ピッチ角 θ 、羽根幅 W の関係を求める第6図に示されるようになる。

3) n_p と n_s についても以上と同様の形でまとめられ

第4図一イ

第4図一ロ

第5図

第1表

インペラの形状	A		B	
	K	m	K	m
2B. 45°	3.32	0.315	3.30	0.311
3B. 45°	2.68	0.350	2.53	-
4B. 45°	2.28	0.287	2.36	-
6B. 45°	2.22	0.309	3.09	-
6B. 30°	2.97	0.289	3.05	-
6B. 90°	1.79	0.318	1.77	-

る。

起泡剤の添加と気泡の相対的強度の低下: M. I. B. C を 15°C で 10~60mg/l 添加して、6枚羽根、ピッチ角 90° のインペラについて n_c を測定し、それぞれの d について既述の $U_c = K/d^m$ をあてはめてみると、 m の値には変化がない。そこで、M. I. B. C 未添加の場合の K を K_0 とし、 F mg/l 添加した場合を K_F として、100 分率で添加量との関係の求めると第7図の実線に示されるようになる。

この第7図の実線に示される結果から、インペラの限界周速を比較値とした気泡の相対的強度は、起泡剤の増加とともに僅かではあるが低下することが認められる。

なお、この図に挿入されている点線は、CT から発泡される気泡の等価直径が起泡剤の添加によって減少する割合を示すものであり、この場合の減少割合の方がインペラによって破碎される場合の値に比較して大きいことがわかる。

4. 被破碎気泡の原粒度と再生粒度

起泡剤の増量につれて再生気泡の粒度が縮小される傾向⁴⁾や、インペラによって破碎される気泡の再生粒度の最大・最小値が回転数の増加とともに低下する割合⁵⁾などについては報告されているが、いずれの場合でも被破碎気泡の原粒度と対比されていない。

したがって、ここでは主として原気泡について、その粒度とともにその形状(長・短軸比をもつて取扱う)を

第 6 図

第 7 図

も考慮して、再生粒度、再生粒度 / 原粒度などとインペラの回転数との関係を明らかにするとともに、あわせて起泡剤の効果を重ねて検討することとした。

再生気泡粒度比とインペラの周速: d をかえて $\sqrt[3]{a \times b^2}$ をそれぞれ測定して再生粒度比 $\sqrt[3]{a \times b^2/d}$ を算出し、インペラの回転数との関係を求めると第 8 図に示されるようになる。ここで、実線は起泡剤未添加の場合であり、点線と鎖線は添加した場合である。

この第 8 図に示される結果から、実験式をまとめると再生粒度比 $R = R_0 - K'(U - U_c)^{m'}$ となる。ここで、 R_0 , K' , N_c , m' は第 2 表に示されるような値である。

第 2 表

d mm	n rpm	R_0	$K' \times 10^{-6}$	m'
2.45	510	0.735	2,120	0.794
4.70	440	0.470	1,820	〃
5.50	405	0.450	1,830	〃
6.60	380	0.420	1,690	〃
7.60	360	0.360	1,420	〃

さらに、 R_0 , K' と d との関係を吟味すると第 9 図に示されるようになるので、結局 $R = d^{-0.500} - (2,430 - 123d) \times (U - U_c)^{0.794} \times 10^{-6}$ となる。

以上の関係式に示される結果から、つぎのことが認められる。

- 1) 原気泡を限界破碎周速 U_c をもって破碎する場合の再生粒度比は、原粒度 d mm の平方根に逆比例する。したがって、粗大な原気泡ほど縮小される比率が大きい。
- 2) 限界周速よりも高い周速で破碎するほど、再生粒度比は小さくなる。
- 3) 1)と2)に示される結果は、実際操作においてインペラの破碎作用が増大するにつれて、再生気泡が微細化するとともにその粒度がそろってくる³⁾理由をよく定量的に解明するものである。

起泡剤の添加と再生気泡の縮小*: 本実験においても、

* 表面活性剤の微量添加によって気泡の運動状態が違ふことは、最近の研究によってかなり詳細にされてきている。

第 8 図

第 9 図

転覆式カップの中で単一気泡をつくるのが、起泡剤の増量とともに困難となることが認められるので、起泡剤の添加が気泡の併合成長の防止に役立つことが理解されるが、第 8 図の点線と鎖線によつて示される結果から、さらに、つぎのような効果が認められる。

- 1) 起泡剤の増量とともに再生粒度は減少し、したがって再生粒度比も低下する。
- 2) 再生粒度は原粒度にかかわらず、漸次一定値に近づく。

再生気泡の粒度縮小にたいして示されるこのような効果は、既述の限界破碎周速の低下にたいして示された効果に比較すれば顕著である。

本実験では単一気泡と被破碎気泡として採用しているため、破壊によつて発生する再生気泡の数は僅少でありその相互衝突や接触の機会はきわめて少ない。

このような結果から、R. E. Pattie その他⁶⁾の起泡剤

の気泡にたいして与える効果に対する説明は、完全なものでなく、一部訂正の余地があると考えられる。

原気泡の形状と再生粒度：本実験に使用した原気泡の粒度は 2~8mm 等価直径の範囲のものであるので、その粒度によって形状が違い、それぞれの間に相関関係がないことは宮城その他⁷⁾による気泡の上昇速度曲線から容易に判断される。

同一体積の気泡でも形状によってその安定度が違う⁸⁾ので、その破碎強度が違い、その破壊の仕方も同様でないように観察されるので、再生粒度も違うものと考えられる。

このような見地から、インペラの回転数をかえて d と $\sqrt[3]{a \times b^2}$ との関係を求めると第10図に示されるようになる。

この第10図に示される結果から、インペラのどの回転数にたいしても、ほぼ 5mm 等価直径の原気泡が最小の再生気泡を与えていることが認められる。

つぎに、このような結果が示される原因を明らかにするために、原気泡の d と a/b , 上昇速度 U_b を念のために求めると第11図に示されるようになり、上昇速度曲線には $d=5\text{mm}$ 付近に転折点があり、この範囲の気泡が最も大きな長・短軸比をもっていることがわかる。

この第10図と第11図の結果を総合することによって、原気泡の形状が再生気泡の粒度に密接な関係をもっていることが、よく実証される。

原気泡の形状と限界破碎周速： d と n_c との関係をピッチ角 90° , 羽根数 3 枚のインペラについて、改めて求めると第12図に示されるようになる。

この第12図に示される結果から、既述のように $U_c = K/d^m$ として 1 本の対数直線にまとめるには多少の無理があり、より正確には $d=5\text{mm}$ 付近を転折点とする 2 本の直線となることが明確となる。このことから原気泡の形状もまたその破碎強度に影響することが十分に裏がきされる。

5. インペラの気泡破碎作用とポンプ作用

羽根数と気泡破碎作用：気泡の変わり、破碎作用の原動力となる流相の変化は羽根そのものに依存するので、羽根数に比例して破碎効果が高まるように考えられるが、事実は羽根数が多くなりすぎるとその効果は急速に低下される。

このような現象のあることは、小型 FW 浮選機のインペラについて

第 10 図

羽根数と群粒再生気泡の粒度の関係として林がすでに報告している⁹⁾ところであるが、このことはまた前掲の第 6 図に示されるような羽根数と限界破碎周速との関係においても、よく認められる。

このことをさらに吟味するために、第 4 図に示される数値を利用し、羽根数をパラメータとして $\log(1/n)$ と $\log \pi/4 d^2 + (\pi/4 D^2 + B)$ との関係、すなわち、気泡を等価球と仮定したときのその最大断面積と羽根溝間面積との比を求め、これと限界破碎回転数 (n_p と n_c) との関係を調べると第13図に示されるようになる。ここで、 B は羽根数、 D はインペラの外周径である。

この第13図に示される結果から、無破碎通過の n_p 群の曲線についても羽根数の違いによる影響が示されてい

第 11 図

第 12 図

るが、各線は接近しており、かつ測定値のばらつきも大きいので、この違いを無視して羽根溝間の広さに比例して気泡が容易に通過するものとみなしても大差ないものと認められるが、細破碎の n_c 群については、各線の傾向は整然としておるので、羽根数の影響を無視することは到底できないばかりでなく、羽根数6枚の場合は4枚までの順序と逆になっていることまでが明確に認められる。

この n_c 群の示す傾向は、気泡の破碎作用を支配するものは鉋液の流れ作用であり、羽根数の少ない場合には羽根数の増加につれて羽根1枚当りの破碎効果が増加するが、羽根数が多くなれば流れの案内作用は良好となるか1枚当りの気泡破碎効果はかえって減少することを明らかにしているものといえる。

気泡破碎作用とポンプ作用：本実験に使用したインペラでは、6枚が最高の羽根数であり、この範囲ではポンプとしての排液能力は枚数に比例して増加するものと推察される。したがって、もしこのような推察が正しいものとすれば、第6図に示される $K-B$ 曲線や第13図に示される n_c 曲線の傾向は、インペラのポンプとしての能力と気泡破碎の能力とは、常に平行して増進されるものでないことを示すものと考えられる。

このような見地から、すでに使用したそれぞれのインペラについて、ポンプとしての能力を示す排液速度 V_p と回転数 n との関係を求めるとともに、このようにして求めた関係曲線上に各粒度の原気泡にたいする n_c 値を記入すると第14図に示されるようになる。

この第14図に示される結果から、それぞれのインペラ自体については、回転数の増加にともなつて排液速度と気泡破碎能力とが平行して増すことが認められるが、羽根数やピッチ角を異にするインペラ間で比較する場合には、このような平行関係は示されず、排液速度が大きく

第 14 図

ポンプとしての能力の高いものが、必ずしも気泡破碎の能力にすぐれているものでないことが認められる。

このような結果は、FW 浮選機のインペラについては流れをよく案内してそのポンプ能力を高くするだけでは気泡破碎能力を高めることにならず、剥離渦や衝撃流などを強化してポンプとしての性能を低下させた方が、かえって気泡破碎能力を増大することになることを、よく示していると考えられる。

6. 結 言

本研究は、Fahrenwald 浮選機のインペラにおける外気気泡の破碎現象を詳細に探究する手段として施行したものであつて、立型回流水槽中のかい型羽根インペラに単気泡を破碎させ、原粒度とその相対的破碎強度、原粒度と再生粒度、気泡の形状と再生粒度などの諸関係を明確にするとともに、強度や再生粒度におよぼす起泡剤の効果を吟味し、あわせて、インペラの気泡破碎作用とポンプ作用との関連を改めて検討したものである。

実験の結果に認められる事項を要約すると、つぎの通りである。

1) 単気泡の原粒度 d mm とその相対的破碎強度との関係は、それぞれのインペラについてその限界破碎周速 U_c m/sec をとれば、 $U_c = K/d^m$ として表わすことができる。ここで、 m は常数、 K はインペラの形状・寸法によつてかわる係数である。

2) d mm の原粒度にたいする再生粒度のは比 R は、 $R = d^{-0.500} - (2,430 - 123d)(U - U_c)^{0.794} \times 10^{-6}$ としてまとめることができる。ここで、 U はインペラの任意の周速であつて、 $U > U_c$ である。

3) 気泡の形状の相違は、その破碎強度に影響するばかりでなく、再生粒度をも左右する。

4) 起泡剤の増量につれて、限界破碎周速が漸次低下

第 13 図

する(ただし低下率は小さい)ばかりでなく、再生粒度も減少する。

5) インペラのポンプとしての性能が高いことは、同時に、気泡破碎作用が高いことを示すものではない。

謝辞：本報告を含む本会誌に掲載された既往の研究はすべて林が鹿児島大学に在職中に施行したものである。実験中にうけた当時の同僚各位の御援助にたいして、改めて厚く御礼申上げる。

参 考 文 献

- 1) 林大輔：日本鉱業会誌，73巻，823号，24～25頁（昭和32）
；74巻，836号，90～91頁（昭和33）

- ；75巻，849号，174～176頁（昭和34）
；75巻，853号，464～468頁（昭和34）
2) D. W. Fuerstenau 外1名：T.I.M.E., June, p. 694 (1958)
3) R. L. Darta 外2名：Inst. Chem. Engrs., 28, p. 14 (1950)
小林清志：日本機械学会論文集，19巻，80号，66～68頁（昭和28）
4) С. И. Лолбкны：“選鉱学下巻”（中国訳）211頁（1955）
5) 実吉純一：日本音響学会誌，9巻，2号，177頁（昭和28）
6) C. M. Maier：U. S. Bur. Mines, Bull. p. 260 (1927)
7) 宮城吉五郎：日本機械学会誌，28巻，95頁（大正14）
D. W. Krevelen 外1名：Chem. Eng. Progr., 46, 1, p. 29～34 (1950)
F. N. Peebles 外1名：Chem. Eng. Progr., 49, 2, p. 88～97 (1953)
O. Levenspiel：Ind. Eng. Chem., 51, p. 787～790 (1959)
8) J. Plateau：Gaudinの“Flotation” p. 350 (1957) に簡単な紹介あり。
9) 林大輔：日本鉱業会誌，73巻，823号，24～25頁（昭和32）

吊 下 式

3 段 デ ッ キ

テ ー ブ ル

最近米国の Deister Concentrator Company から発売された CONCENCO “666” ダイアゴナル・デッキ・テーブルは、従来の一段デッキの No. 6 テーブルと同一寸法のデッキを3段重ねにして、頭上の支持梁からワイヤ・ロープで吊下げたもので、全テーブルは全く宙に浮いた状態で運転される(第1図)。この新式テーブルは2年間にわたる試験の後、主として米国とカナダの鉄鉱石のパイロットプラントで実地に試用された。現在“666”テーブルの実操業は3カ所で成功している。そ

れは Florida の燐灰石、カナダの British Columbia の重晶石、Quebec のニオブ鉱石に用いられているものである。さらにカナダ北西部のタングステン鉱石にも使われる予定である。

3段デッキ CONCENCO “666” テーブルの主な長所は(1)旧式の1段デッキに比して、同一床面積で3倍の処理能力をもつこと、(2)支持構造にほとんど衝撃を伝えず、頑丈なコンクリート床が不要なこと、(3)したがって設備費が安いことである。(広部良輔)

Production Equipment
Preview, World Mining,
November, 1962, p. 37 より