浮選槽底の攪拌に関する研究*

—— 副羽根によるもの ——

正 会 員 林 大 輔**
正 会 員 中 村 虎 重***
准 会 員 山 口 忠 雄**

Studies on Agitation at the Bottom of Flotator

Daisuke HAYSHI, Torashige NAKAMURA and Tadao YAMAGUCHI

It is known that the function of auxiliary blades attaching to the impeller of Fahrenwald flotator is consisted in preventing settling of ore particles by applying agitation to the bottom of cell as subsidiary action assisting the main blade, while both the types of fluidization of ore particles by auxiliary blades and the relationship of the main blade with auxiliary blades have not been made distinct.

From the point of view above, the authors inspected the flow patterns at the bottom of cell employing the apparatus composed of an agitator of batch-system and a model impeller. The results obtained are as follows:—

- 1) The critical agitating speed at which the ore particles are fluidized is to be varied in response to the difference of geometrical condition in the relation between the cell and the impeller.
- 2) The critical setting-depth of impeller where the minimum critical speed is available under the same condition, is to be obtainable.
- 3) By lowering the critical depth with dish-like bottom to that of impeller installed and by applying bottom-agitation effectively with the main blade, the essential agitation is made possible by the minimum power.

1. 緒 言

Fahrenwald 型浮選機インペラについている副羽根の機能は、主羽根を補助して槽底の攪拌を強め鉱粒の沈降を防止するにあるが、その鉱粒の流動に及ぼす影響や主羽根作用との相関などについては明らかにされていない。

このような見地から、小型の回分式攪拌装置を用い、近似一次元的な手法を主用して、副羽根と槽に関する幾何学的条件と鉱粒の流動限界速度との関係を解明し、主羽根を加えた場合との比較を併せて探求した。

2. 装 置 と 方 法

攪拌槽内における固形粒子の流動、浮遊の度合を定量する方法¹⁾²⁾³⁾の中で、永田法³⁾は著者達の使用する形状

のインペラの場合に応用すると、低インペラ設置高度で、その流動限界速度⁴⁾の判定に困難があるが、その限界量判定の基準を多少変更すれば十分に利用され、簡便であるので、実験方法の多くをこれに倣うこととした。

攪拌槽とインペラ：第1図のようなものを透明な合成

第 1 図
実験に使用した槽とインペラ

* 昭和33年10月11日受理 昭和33年度本会秋季大会にて発表

** 鹿児島大学工学部教授 *** 鹿児島大学教育学部

a) 文献 3), $H_p \geq 0.2D$ について円筒槽に横型インペラを使って測定しているが、この結果から $H_p < 0.2D$ 以下の場合の推察は困難である上、槽底面の周壁部と中心部に静止粒子のなくなった瞬間の軸回転数(流動限界速度 sn_c と en_c)を判定することは、ばらつきが著しく不確実である。

樹脂板で作成し、ⅡとⅢの角槽を主用し、比較としてⅠの円筒槽をあて、インペラA、A'、Bを副羽根単独の機能調査用、Cを主羽根を加えた場合の模型として利用した。

鉱粒：球形に近い標準ガラス粉末の各粒度のものを試用したが、微細なもののほど流動限界速度の判定も困難であり、槽内の流相も識別しにくいので、第1表の粒度組成のものを専用し、液の深さ $H_0 = D$ とし、これに液量の2.5% 容積にあたるガラス粉末を投入して

第1表

mesh	%
+ 48	0
+ 60	10.24
+ 65	49.21
+ 80	28.30
+100	4.85
-100	7.39

成のものを専用し、液の深さ $H_0 = D$ とし、これに液量の2.5% 容積にあたるガラス粉末を投入して攪拌した。

粒子流動限界速度：槽底を鏡に照して粒子の流動状態を観察し、

周壁部と中心部について、それぞれの粒子流動限界速度 sn_{c2} と cn_{c2} を求めて比較の対象とした。この値のとり方は永田法(脚註)と原則的には同様であるが、それぞれの部分に静止粒子がなくなつた時の値 (sn_{c1} と cn_{c1})^{b)} は判定が困難であるので、さらに回転数を増し最後の粒子も相当活発に流動を始めたとき確実に認められる時の回転数を採用したので、 $sn_{c2} > sn_{c1}$; $cn_{c2} > cn_{c1}$ となる。

この限界値測定のための具体的な要領を、第2図の角槽底の粒子流相図について説明すると次の通りである。

(イ) $H_p = 0.95D$ (ロ) $H_p = 0.4D$ (ハ) $H_p = 0.5D$

第2図 槽底のフローパターン、A型 $d_2 = 0.5D$, $h = 0.05D$, 300rpm, 角槽Ⅱ(扁平底)

周壁部—— H_p の低い場合は(イ)図のように、回転数の増加につれ周壁内接円内の粒子がまず流動浮遊し、以後漸次隅の部分に及び、最後に(a)領域が残るので、この領域の粒子を対象として sn_{c2} をとる。 H_p の高い場合は(ハ)図の E' が全体に先立つて透明となるが、この領域に拘泥せず、上と同様にする。

中心部——この部分については円筒槽の場合と同様として、 H_p の高低をとわず、(c)領域を対象としここに生ずる透明化した小円内の残留粒子について cn_{c2} をとる。

なお、このようにして測定した限界速度値も同一 H_p

b) 文献³⁾では sn_c と cn_c とされている。

c) 本報で nc として sn_c と cn_c を区別しない場合は、一般に流動限界速度という意味を表わした場合と、 sn_c と cn_c を比較して高い方の値だけを採用したことを意味する場合とがあるが、後者では例示の図中に cn_c に属するものを点線で現わしているので区別できる。

についてなお相当のばらつきがあり、 H_p を異にした場合についても粒子活動のし方に相違があるので、最善のものではない。したがって粒子がさらに完全に浮遊化してインペラの下部がほとんど透明化した時を選び、この一定透明度²⁾を基準にした、より高回転の nc_3 を限界値として比較する方が、 sn_c と cn_c の区別も必要とせず、測定も容易である。この方法で nc_3 を一通り測定したが高回転のためインペラ中に空気を巻込むことが多く、一部に応用できただけであつた。

第3図は槽Ⅰによる H_p と nc_1 , nc_2 , nc_3 ^{c)} との関係の例示である。

第3図 測定基準の相違と粒子の流動限界速度 nc

補助測定：本実験では既存の報告^{3,4)}に詳細でない低 H_p の範囲を重視して扱い、その結果も新しいものがあるので、測定値の確実性の裏づけを兼ねて、槽底部とその関連部分の水の流相を明らかにすることとし、後掲第8図と第14図のようにビト管を槽底の各要点に植えて、中心部静圧 ch と中間部の半径方向動圧 sh を計ると共に、第4図と第5図のように槽底と周壁部に一端固定の微細絹糸を流し、その流線を一直面にそれぞれ投射して、 $\tan \theta$, $\delta R/R$ を求め、以上の両法を併せて上下流や内外向流の大きさを略査した。

第4図 絹糸による周壁のフローパターンの定量

第5図 絹糸による槽底フローパターンの定量

第6図 $snec$ のばらつき範囲と H_{pc} の存在

3. 実験結果と論義

3.1 円筒槽 I による実験

円筒槽の場合でも低 H_p における H_p-ne 関係とその水流関係は定量的に不明である³⁾。この関係を明らかにし、かつ角槽との対比をする意味で、扁平底の円筒槽について実験をした。新しい結果と考えられるものは次の通りである。

$snec$ の最小値を示す限界高度 H_{pc} の存在：すでにその一端を第3図に示したが、 $snec$ が H_p とともに増すに反し、 $snec$ は最小値を示す H_{pc} が存在し、 $H_p > H_{pc}$ となつて初めて H_p とともに増加する。

第6図は各々 d_2 についてまとめたものであり、 d_2 の大きいほど H_{pc} は小さい(斜線内がばらつき範囲、斜線のない曲線部はさらに不確定のところ)。

同時流動インペラ径 d_{2s} と H_p ⁴⁾：第3図で s_1, s_2 と

- d) 文献 3), 適当径 d_2 のときは $snec = enec$ となる。この d_2 を同時流動インペラ径とよぶ。この d_{2s} は H_p によつてほとんど差がないとされている。
- e) 文献 4), H_p によつて流動の様式がわかることを権型インペラの場合について定性的に一応指摘されている。

して示した通り、 d_{2s} は H_p と密接に関連し、低 H_p はど大径のものとなる。

槽底流動の様式と H_p ⁵⁾：筆者達の場合も、内容は異なるが、 H_p で様式が第7図のように相違している。(イ)図のE領域に位する粒子は $snec$ が上昇しても停滞振動して流動しにくく、この現象と $snec$ 曲線に最低値のある傾

第7図 円筒槽下部のフローパターンの様式

(イ) 第8図 ピトー管による槽底内外流の大きさの比較とインペラ径

(ロ)

第9図 絹糸ではかつた槽底内外流の大きさの比較

第10図 インペラ径と槽底中心の負圧向とはよく関連する。

この関連を K_1 点に対する $\sqrt{sh}-H_p$ 曲線と N_1, N_2 点などに対する $\delta R/R-H_p$ 曲線によつて確かめると、第8図と第9図となり、両図はよく傾向が一致し、併せて、 H_p の高低によつて周壁からの巻戻り速度が相違し、同一周速では d_2 の大きい程低 H_p でよく巻戻り、全底面にわたる内向き流れが完成して、より早くE領域が消失することを証明し、 H_{pc} 値がより低い位置に移ることを理解させる。

なお、 K_0 点についての $ch-H_p$ 曲線を念のため掲げると第10図となり、 $cnc-H_p$ 曲線の傾向を十分に裏づける。

周壁流動の様式と H_p ：第5図の M_1, M_2 点について $\tan \theta$ を計ると第11図となり、周壁に沿つて上昇した流れは、再びその内側を下降し、インペラ下底に入つて内向流となる。この上下流の変化と第8図、第10図を併せると第7図のような循環が推察される。

3.2 角槽 II による実験 (扁平底)

この場合の結果は次の通りである。

第13図 周壁上下流の大きさの比較とインペラ設置高度

第12図 扁平底による H_{pc} の上昇

第11図 周壁上下流の大きさの比較とインペラ設置高度

nc_2-H_p ：この関係は第12図となり、円筒槽と違つて隅の部分の粒子の流動が困難となつて、低 H_p 程 nc_2 が上昇し、 H_{pc} は円筒槽の $\leq 0.3D$ に比して $\leq 0.4D$ とやや増高しているが、 H_{pc} における nc_2 値は円筒槽のそれとはほぼ同様である。

流動の様式と H_p ：この場合の周壁流について $\tan \theta$ を M_1, M_1' 点で計ると第13図、 K_0, K_1, K_2 などについて ch と $\sqrt{sh}$ を求めると第14図となる。これらの図から、それぞれの内容は円筒槽と大分異なるものの、 H_p の高低による流動様式の変化は依然存在し、 H_{pc} が高値に移動し、一般に円筒槽に比して上下流が強く、とくに高 H_p で顕著な下降流となるなどが確認される。この最後の現象は H_{pc} における nc_2 値が円筒槽のそれに近いことを意外とさせない原因となるものと考えさせる。

既掲の第2図のシンボリックの流柱図は、この場合のものである。すなわち(イ)図のE領域は第7-(イ)図のE領域と類似の原因による粒子の停滞振動域である。一方(ハ)図のE'領域は既述のとおり早く透明化する領域で、この存在は下降流がここにあつてよく清掃するものの、その後槽底を這わず、斜に急上昇してインペラ中

第14図 (イ)における中心負圧と槽底内外流の大きさの比較

第15図 槽の形状による snc_2 の比較 第16図 皿型底による H_{pc} の引下げ 第17図 h と d_2/d_1 の nc_2 におよぼす影響の比較

心に向うことを示すものであつて、この生成は snc_2 値の引下げには効果がない。結局(ロ)図の状態のとき粒子はよく槽底全面にわたつて円滑に流動する。すなわちこれが H_{pc} に相当する流相である。

同時流動インペラ径 $d_{2s} : H_{pc}$ で $(0.6 \sim 0.7) D$ であり、当然大きくなつてはいるが、換算すれば $(0.4 \sim 0.5) \sqrt{2D}$ となり、対角線長からすれば円筒槽におけると同比率である。

3.3 角槽 II' による実験 (II の隅をつぶした場合)

実技で槽の下底部のみを円形としたり、隅をつぶした構造がある。この機能を確かめる意味で、II' 槽のように隅をTの△型ブロックでつぶし nc_2-H_p 曲線を探めると、その傾向は扁平底角槽と円筒槽の中間にあるに過ぎず、格別 H_{pc} の引下げには効果を示さないが、 H_{pc} と $H_p=0.1D$ における snc_2 を比較すると第15図となり、 $snc_{2,0.1}$ 値 ($H_p=0.1D$ における snc_2 、以後同様とする) そのものは角槽より20~30%減となる。

3.4 角槽 III による実験 (四型底)

実技の多くは四型底となつており、円筒槽の場合はこの構造によつて、 snc が引下げられ d_{2s} がより小径となるとされているが、角槽についてはなお別の効果があるものと推察したので、角槽IIIについて以上の実験に専用したA型インペラのほかに A', B, C の別型を加えて実験した。その結果は次の通りである。

$nc_2-d_2-H_{pc} : d_2$ だけを変数としたA型について nc_2-H_p 曲線を探めると第16図となる。この結果では d_2 による H_{pc} の相違までは明確でないが、 $H_{pc} \leq 0.1 \sim 0.15 D$ と移り、この場合の最底 nc_2 値は扁平底の場合とほぼ同値であり、四型底の円筒槽では見られない現象を示す。

第18図 最適インペラを求めるための比較

第19図 槽底のフローパターン、A型 $d_2=0.5D$, $h=0.05D$, 460rpm, 角槽III (皿型底)

f) 筆者の実験、未発表、1949年度鹿児島大学工学部紀要に発表の予定

この H_{pc} を中心とした曲線の左右部分についてそれぞれの傾斜を比較すると、 d_2 の大きいほど緩勾配であり、したがって、 d_2 の大きいほど H_{pc} 以下にインペラを設置しても nc_2 の増加は少ないことがわかる（次の h と d_2/d_1 についても同様）。

nc_2-h ; nc_2-d_2/d_1 : 同径の A 型で h を変えた場合と、同径、同高の A' 型で d_2/d_1 を変えた場合のそれぞれについて nc_2 を求め、 $snc_{2,0.1}$ についてまとめると第 17 図となる。この傾向は円筒槽における櫛型インペラの動力比較値⁵⁾⁶⁾を逆値としたものと類似している。

u_2 ; $n'^3 c_{2,0.1} d_2^{2.7}$; $n'^3 c_{2,0.1} d_2^{5.8}$ — d_2 : 第 16 図について外周速 u_2 その他の量 (n' は rps) を比較すると第 18 図となる。この場合は高乱流域⁷⁾に属し、レイノルズ数による変化はないので⁸⁾、相似則の不成立を無視して動力係数を同一値と仮定すれば、動力最底の d_2 は $0.45D$ と見当づけられる。この値は円筒槽の場合³⁾と類似している。

このことは槽底攪拌に関する限り、槽底を皿型 ($r=0.15D$) にした角槽は円筒槽と同一大きさのインペラではほぼ同一の効果を上げることを意味する。

流動の様式と H_p : 第 16 図の裏づけのため、同一 $nc_2=460\text{rpm}$ (H_{pc} における nc_2 の値) を使つて、各 H_p に対応する槽底の粒子の流相をスケッチすると第 19 図となり、槽底の要点に流した絹糸の流れ方向とその立上り角を例示すると第 20 図となる。

第20図

絹糸による槽底フローパターン判定, 角槽Ⅲ

以上の両図から $H_p \approx 0.1D$ の場合が、底面の大部分において、周壁からの巻返しが強くなり円滑であり、内向流が底面によく沿って中心へと連続流動し、隅の部分の外向流れもよく底面を這い、粒子の停滞域がないことがわかる。

B 型と A 型の比較: 実技用の副羽根は平羽根でなく、三角または変形三角羽根が多い。この点を考慮して A, B 型を比較すると第 21 図となり、同羽根面積では B 型が劣り、 H_p の高いほどその差が大きい。

立羽根と副羽根作用: 空気の巻込防止のため邪魔副羽根を挿入し、同径の A, C 型を対比使用すると、その nc_2

$$g) \quad nc_{2,0.1} d_2^2 \cdot \frac{\rho}{\eta} \approx (4.35 \sim 8.16) 10^4, \text{ ただし } d_2 = (0.4 \sim 0.7) D$$

で 25°C の場合。 η は水の粘性係数、 ρ はその比重。

第21図

平羽根と三角羽根の nc_2 の比較

第22図

主羽根作用の nc_2 におよぼす影響

— H_p 関係は第 22 図となる。

この図から、主羽根を加えたものを低 H_p で使用すれば、中心部の吸上げ作用はかえって若干劣化するが、周壁部の粒子の流動は良好となつて snc_2 が低下し、その低下する度合は $h+h_0$ に等しい羽根高さの副羽根によるものと近似すること、高 H_p で使用するほど nc_2 がますます劣化され、 snc_2 引下げの効果も急激に減衰することがわかる。

4. $>nc_2$ の回転数と H_{pc}

実技インペラの外周速は本実験の範囲以上に高い。したがって H_{pc} においてそれに対応する nc_2 以上で使用された場合の現象を考慮する必要がある。

インペラの回転数が変化すると H_{pc} の位置が変動する事実は、円筒槽における第 3 図で、 H_0 点が $0.15D$ 付近に低くなっていることで証明済であるが、さらに明確とするため第 8 図の例示のような結果を利用し、最大 $+\sqrt{sh}$ 値を示す H_p を求め、回転数とこの H_p との

第23図 最大 $\sqrt{sh}$ を示す H_p とインペラ回転数

関係を調べると第23図となり、一層はつきりする。

そこで同様のことがⅢの皿底角槽に存在するかどうか確かめると、回転数の増加につれいずれの H_p でも粒子の浮遊はより完全となるが、 $H_{pe} \approx 0.1D$ 以下に H_p の移ることは確認できなかった。

このことは、副羽根単独では槽の幾何学的条件と関連する流動様式の制限を越える H_{pe} の引下げは不可能であり、立羽根を加えて低 H_p で運転した場合に実現した $H_{pe} < 0.1D$ のようなことは見出せないことを示す。

5. 結 言

本実験装置は回分式であるが、槽底攪拌に関する限りでは連続式と類似の流相を展開するので、この実験結果

は、浮選槽底と副羽根に関する実技構造の機能を示し、設計のための資料となるものと考える。

結果を要約すると次の通りとなる。

- 1) 槽と副羽根との幾何学的条件により、槽底粒子に対する流動様式が異なり、流動限界速度が違う。
- 2) 特定のインペラ設置高度で最小の周壁部流動限界速度を与える（実技用の d_2 の大きさでは $sn_c > cn_c$ なので sn_c が支配因子となる）。
- 3) 皿型底や主羽根の作用は限界高度と限界速度を引下げる効果をもつ。
- 4) インペラの実技的設置高度とこの限界高度とを一致させることは、最適の副羽根に必要な槽底攪拌を実現することを意味し、無用な動力の消費を防止することとなる。

謝辞：本実験にあたって、文献や助言を戴いた東工大板谷松樹、森永卓一；東大、今泉常正；九大、湯浅陽一の各先生と、引用文献の筆者である京大、永田進治；批判を戴いた京大中川有三の各先生に深謝申上げる。

参 考 文 献

- 1) Hixson, A. W., A. H. Tenney: Trans. A. I. C. E., **31**, 113 (1934), White, A. M., et al: Ind. Eng. Chem., **24**, 1160 (1932).
- 2) 大山・遠藤：化学工学, **20**, 666 (1956).
- 3) 永田・横山・南条：同上, **17**, 98 (1953).
- 4) 永田・横山・北村：同上, **17**, 95 (1953).
- 5) 永田：化学機械技術 第9集, 197 (1957).
- 6) 永田・横山・斎藤：化学工学, **18**, 228 (1954).
- 7) 永田・北村・藤永・谷井：同上, **15**, 59 (1951).
- 8) 河東・山本・石川：同上, **17**, 236 (1953).

有機重液による浮沈試験とその回収法

浮沈試験を行うには中間比重の重液が必要であるが、それには沃化メチレン CH_2I_2 (比重 3.30) とベンゼン C_6H_6 (比重 0.86)、またはテトラブromエタン $\text{CHBr}_2\text{CHBr}_2$ (比重 2.96) と四塩化炭素 CCl_4 (比重 1.60) の混合液が普通用いられている (第1表第2表)。

浮沈試験によつて分離した産物は

第1表 テトラブromエタンと四塩化炭素混合液の比重

$\text{CHBr}_2 : \text{CHBr}_2$ ml	CCl_4 ml	液の比重
80	0	2.96
80	2	2.93
80	6	2.89
80	10	2.81
80	16	2.73
80	20	2.69
0	20	1.60

乾燥と秤量に先立つて重液を除くためにアセトンで完全に洗う必要があり、この際重液の損失を生ずる。この重液は水とよく混ざることによつて、アセトン洗滌液から回収することができる。アセトンは水と混ざりやすいから、重いテトラブromエタンは容器の底に沈み、容易に回収できる。(写真参照)

第2表 沃化メチレンとベンゼン混合液の比重

CH_2I_2 ml	C_6H_6 ml	液の比重
100	0	3.30
95	5	3.18
90	10	3.05
85	15	2.93
80	20	2.81
75	25	2.70
0	100	0.86

またテトラブromエタン系ないし沃化メチレン系の重液は、それぞれ四塩化炭素ないしベンゼンの沸点 (前者は $76 \sim 77^\circ\text{C}$ 、後者は 80°C) まで水浴中で暖めることによつて再生することができる。ただしこの作業は、浮沈試験の操作と同様、フードの下で適当な換気を行いつつやらなければならない。(DECO Trefoil, Mar.-Apr., 1957 より) (井上外志雄)