湿式サイクロンの2, 3の問題点について*

井 上 外 志 雄**

岡 野 靖 彦***

Some problems of hydrocyclone

Toshio INOUE, Yasuhiko OKANO

Considering the outstanding merits of the hydrocyclone, it seems natural that it should likely replace the mechanical classifier in a closed grinding circuit.

In this paper discussions were made about several problems in applying the hydrocyclone into practice. Thus available references including the authors' were reviewed through the following items :

- 1) Standards in selecting the dimensions of a hydrocyclone
- 2) Influences of the feed size on the performances of a hydrocyclone
- 3) Control of hydrocyclone operation
- 4) Some ideas newly developed in studies of the hydrocyclone

1 ま え が き

湿式サイクロン（液体サイクロン）は遠心力を利用した一種の湿式沈降分離機であり、現在の標準型の湿式サイクロンがオランダ国炭鉱研究所の M. G. DRIESSEN によって開発され、選炭工場においてはじめて大規模な工業的利用がなされたのは約30年以前のことである。その後種々の型のもの^{1), 2)}——たとえば円筒型のもの、球形のもの、2 段型のもの、回転羽根を内蔵するもの、オーブントップ型のもの、さらに最近ソ連において発表されている2つの円錐部をもったもの^{3) 4)}など——が開発されているが、結局標準型のものももつとも広く使われている。

湿式サイクロンはその機能上、分級だけでなく分液および選別などに利用されるので、ここで問題にしている分級用のものをとくに湿式分級サイクロンと呼ぶことがある。

湿式サイクロンの長所としては、

- i) 構造が簡単、小型で機械的可動部がないこと
- ii) 設置が容易で設備費が安いこと
- iii) ホールドアップが小さいために休転の際の処置が容易であること

iv) 分級精度が比較的高いこと

一方、短所としては、

- i) ポンプその他の動力費が高いこと
- ii) 摩耗のため維持費がかさむこと
- iii) フィードの量的、質的変動の影響を受けやすいこと

などの点があげられるのは周知の通りである。

選鉱工場における種々の粉碎閉回路に対して湿式サイクロンが近年盛んに採用されるようになってきた^{5)~8)}ことは、湿式サイクロンがこのような著しい特徴を有し機械分級機に比して優れた点が多いことを考えれば、当然の傾向といえるであろう。

しかしながらサイクロンの機能に影響を及ぼす因子に関する研究が、これまで非常に数多くの研究者によって行なわれているにもかかわらず、影響因子の数が多く、しかもそれらが交互に影響し合うために、いまだ研究成果が十分には体系化されていない状況にある。そこで本報では実地的な見地から以下のような設計上および管理上の2, 3の点に焦点を絞って問題を整理してみたい。

2 サイクロンの設計基準

2.1 標準型サイクロン

D.A. DAHLSTROM その他の研究者によれば、サイクロンの各部寸法比についてつぎのような値が標準的なものとされている⁹⁾。

$$d_i = \left(\frac{1}{6} \sim \frac{1}{7} \right) D \dots\dots\dots (1)$$

* 昭和43和5月16日、第40回浮選研究会例会「粉碎回路に関するシンポジウム」にて発表の「サイクロン分級理論と問題点」の原稿に多少加筆してまとめたものである。

** 東京大学助教授・工博・工学部資源開発工学科

*** 東京大学大学院学生（博士課程）工学部資源開発工学科

$$d_0 = \left(\frac{1}{2.3} \sim \frac{1}{8} \right) D \dots\dots\dots (2)$$

$$2d_i + d_0 = \left(\frac{2}{5} \sim \frac{3}{5} \right) D \dots\dots\dots (3)$$

$$d_u = \left(\frac{1}{5} \sim \frac{1}{10} \right) D \dots\dots\dots (4)$$

$$l_v = \left(\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2} \right) D \dots\dots\dots (5)$$

$$l_c = \left(\frac{2}{3} \sim 2 \right) D \dots\dots\dots (6)$$

ただし、D：円筒部直径、 d_i ：フィード流入口直径（流入口が矩形の場合は等面積の円を想定しその直径）、 d_0 ：オーバフローファインダ直径、 d_u ：アンダフローノズル直径、 l_v ：オーバフローファインダの長さ、 l_c ：円筒部の高さ

なお、パルプの短絡を防ぐためにフィード流入口の上端のレベルはサイクロン本体の最上端（roof）のレベルに一致していることが必要である⁹⁾。

2.2 分級粒度 d_{50} を与える式

サイクロンの分級粒度 d_{50} に関する実験式および理論式は多くの研究者によって提案されているが、DAHLSTROM による(7)式が代表的なものであろう。

$$d_{50} = \frac{5.3 (d_i \cdot d_0)^{0.68}}{Q^{0.53}} \cdot \left(\frac{1.73}{r - \rho} \right)^{0.5} \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 d_{50} ：分級粒度〔 μ 〕

Q：フィード流量〔l/s〕

d_i ：フィード流入口直径〔cm〕

d_0 ：オーバフローファインダ直径〔cm〕

r：固体の比重

ρ ：液体の比重

D.F. KELSALL はサイクロン内における固体粒子の3方向の速度成分（接線速度^{*}、垂直速度、半径方向速度）の分布を調べ、垂直速度0の点を3次元的に連ねて形成される円錐面を想定し、この面上で水平方向に平衡を保つ粒子の粒度を接線速度および半径方向速度の分布から計算することによって、分級粒度 d_{50} を求め、それが DAHLSTROM の式による計算結果とよく一致することをたしかめた。

V.V. KLIACHIN¹⁰⁾ はこの円錐面（分離円錐面）の考え方を導入し、分離円錐面の面積、出口面積比 d_u/d_0 および分級粒度

^{*} 3つの速度成分のうち、接線速度 V_t の値が最も大であり、この V_t の分布はサイクロン内の流れを特徴づけるものである。つまり $V_{tr}n = \text{const.}$ ただし r：半径方向距離ここで、サイクロン……0.5<n<1, 自由渦……n=1, 遠心分離機……n=1

^{**} この種の報告はこれまでに理論的なものも含めて2, 3みられるが、KLIACHINは従来よりも高濃度（20～40%）のパルプを扱っているのので、選鉱工場における実際の利用価値という点から敢えてここにあげた。

d_{50} との間の関係を解析している。

2.3 サイクロン寸法（円筒部直径D）選択の目安となる図表

すでに示した DAHLSTROM の式（(7)式）によって代表される関係式は、多くの変数を含み複雑であり、しかもそれぞれの適用範囲が狭く限定されていて、実際的な利用価値という点では若干問題が残る。ここでは便宜上標準型の相似サイクロンを想定し、サイクロン寸法を円筒部直径Dによって代表させて、Dと分級粒度 d_{50} との間の関係をみた KLIACHIN の報告^{11), 12)} に注目したい^{**}。彼は、流入圧を一定としたとき、

$$d_{50} \propto D^{\%} \dots\dots\dots (8)$$

$$F \propto D^2 \dots\dots\dots (9)$$

ただし、F：フィード固体量

さらに種々の大きさのサイクロンで一定の d_{50} を得るようにした場合は、

$$P \propto D \dots\dots\dots (10)$$

$$F \propto D^{2.5} \dots\dots\dots (11)$$

ただし、P：フィード流入圧

などの関係式を認め、つぎに同一寸法のサイクロンにおけるF、 d_{50} に対するPの影響を検討し、最終的にサイクロン寸法および運転条件の選定基準を第1図および第1表のようにまとめている。これらの結果は必ずしも絶対的なものとは思えないが、サイクロンの条件を選定するに際して一応の目安を与える簡便な図表といえよう。

3 サイクロンの機能に及ぼすフィード粒度の影響

フィード特性の変動の影響を受けやすいというサイクロンの特徴が、その運転管理上きわめて重要な問題点となることは明らかである。フィード特性として重要なものの1つであるパルプ濃度の影響に関しては、これまで数多くの研究がみられるが¹³⁾、フィード粒度の影響については研究報告が少なく、わずかに Iu.I. NIKITIN¹⁴⁾

第1表 : 各寸法のサイクロンにおける最適分級粒度〔 μ 〕
〔KLIACHIN〕

フィード 流入圧 〔kg/cm ² 〕	サイクロン寸法(円筒部直径)							
	15 mm	25 mm	75 mm	150 mm	250 mm	350 mm	500 mm	750 mm
0.3	18—52	23—70	47—145	78—233	105—310	130—415	170—520	220—670
0.5	13—37	18—52	35—105	55—165	75—220	92—300	120—370	157—480
0.75	10—28	14—42	28—80	42—126	56—170	70—226	92—280	120—365
1.0	8—23	12—35	23—70	35—105	46—140	58—185	75—220	98—300
1.25	7—20	10—30	20—60	30—90	40—120	50—160	65—200	85—260
1.5	6—18	9—26	18—52	28—80	36—106	44—138	56—170	75—220
2.0	5—15	7—21	15—44	23—70	30—90	37—117	46—140	62—190
2.5	4.5—12.5	6.5—19	13—37	20—60	25—75	31—100	40—120	53—163
3.0	4—11	5.5—17	11—33	18—52	23—70	28—90	36—106	47—145
4.0	3—9	5—13	9—28	15—44	19—55	24—74	30—90	42—125
10.0	2—5	3—7	5—15	8—23	10—30	12—40	18—52	23—70

Fig. 1. Average boundary particle size in hydrocyclones of various diameters in dependence of excess feed pressure:

1— $\varnothing$ 750 mm; 2— $\varnothing$ 500 mm; 3— $\varnothing$ 350 mm;
4— $\varnothing$ 250 mm; 5— $\varnothing$ 150 mm; 6— $\varnothing$ 75 mm;
7— $\varnothing$ 25 mm; 8— $\varnothing$ 15 mm.

第1図：サイクロン寸法と分級粒度 [KLIACHIN] ただし、

横軸(下段)：フィード流入圧 [kg/cm²]

縦 軸：分級粒度 [μ]

図中の直線に付した番号(1～8)はそれぞれ図の下に示したサイクロン寸法(円筒部直径)に対応する。

および H.P. WHALEY¹⁵⁾ による報告が注目される程度である。たとえば WHALEY は粉碎閉回路内のサイクロンのフィードパルプ濃度を一定に保った場合、サイクロンのフィード粒度のある程度の変化はオーバフローの粒度に影響を及ぼさないことを示している(第2図)。

第2図：粉碎閉回路における諸変数間の関係

[WHALEY]

著者らはフィード粒度の影響に関して不足していると思われるデータを補うために若干の実験を試み、その結果の一部をすでに発表しているが¹⁶⁾、改めてここに簡単に紹介すると次のごとくである。つまり、第3図に示したように粒度分布の異なる5つの試料(石英)を用意し、他の条件を一定に保ちパルプ濃度を数段階に変えて、サイクロン分級試験を行なった。分級粒度 d_{50} に及ぼすフィードパルプ濃度(δ_i)およびフィード粒度*(d')

* RRB 関数における粒度特性値 d' で示す。

第3図：サイクロンフィードの粒度分布 (RRB線図)

の影響を一括して示したのが第4図である。すなわち δ_i が約35%以下では d_{50} は d' に無関係にほぼ一定に保たれている。 $\delta_i=32\%$ および $\delta_i=38\%$ における d' と d_{50} との関係を示したのが第5図である。因みにア

第4図：サイクロンフィードの パルプ濃度 δ_i 、粒度特性値 d' が分級粒度 d_{50} に及ぼす影響

第5図：各フィードパルプ濃度 δ_i におけるフィードの粒度特性値 d' と分級粒度 d_{50} との関係

* 濃縮とはSCHUBERT¹⁷⁾が述べているように、 $d_{50}=0$ を目標とした分級とも考えられよう。

** この外に所定の固体量がアンダフローノズル近辺に堆積するまでは、外部から力を加えることなく自動的に、アンダフローが現れないように工夫したいわば自力制御というべき制御方法が2, 3発表されている⁹⁾19)。

ンダフロー流出形態は、前者の場合スプレー状、後者の場合ロープ状であった。ただし、実際の粉砕閉回路ではサイクロンフィードパルプはかなり高濃度であるので、高濃度フィードパルプの場合におけるサイクロンの機能に及ぼすフィード粒度 d' の影響をさらに詳細に研究する必要があるように思われる。

4 サイクロンの作動状態を安定に保つための制御方法

4.1 アンダフローノズルの調節

すでに知られているようにアンダフローの流出形態、あるいはその流量（とくに固体流量）はサイクロン運転管理上の重要なファクタであり、アンダフローノズル径 d_u の大きさは、これらに対してもっとも大きな影響を及ぼすものである。従って従来数多くの研究者——たとえば E. HOFMANN, W. LECK —— によってアンダフローノズルの調節方法が提案されている¹⁾。

第6図：アンダフロー自動制御系 [BRADLEY]

第6図はアンダフロー固体量をサイクロン内部の真空度で検出し、それに応じてタイヤ型アンダフローノズル調節装置への空気量を加減し、ノズル径 d_u を調節する方法である⁹⁾。

4.2 アンダフローまたはオーバフローのくり返し

常に所定の濃度以上のアンダフローを得たい場合、つまりサイクロンを濃縮機^{*}として使用する場合、アンダフローパルプ濃度とアンダフロー流出形態との間に第7図のような関係があることを利用して、第8図のごとく希薄なアンダフローをくり返す方法¹⁸⁾—— umbrella control——が実施されている**。

またサイクロンへのフィード量を安定させるために、フィード量が減少した場合にオーバフローの一部を自動的にフィードにくり返す方法⁹⁾も行なわれている（第9図）。

第7図：アンダフロー濃度と流出形態
[DREISSEN and FONTEIN]

第8図：アンダフローのくり返し

第9図：オーバーフローのくり返し

5 サイクロンの利用方法に関する新しい考案

ここでは従来常識的に考えにくかったサイクロンでの

凝集剤添加に関する L.R. PLITT らの研究²⁰⁾ と、粉砕閉回路内でのサイクロンに関する A. J. LYNCH らの研究²¹⁾を紹介したい。

5.1 サイクロン濃縮機における凝集剤添加

サイクロンフィードに凝集剤を添加して微細懸濁粒子のフロックを形成させても、サイクロン内部でとくに接線方向の速度勾配によって生ずる剪断力が原因となって、フロックは破壊され本来の微細粒子に戻るので、サイクロンにおける凝集剤の添加は無意味であるというのがこれまでの常識となっている。しかし PLITT らの報告によると、最近の高分子凝集剤を使用すればサイクロン内部における程度の剪断力には耐えられる強力なフロックを形成させられるということである。かれらによって示された第10図は凝集剤 (Polyacrylamide) の添加によってサイクロンの濃縮効果 E_c [%] が改善されていることを明らかにしている。

第10図：サイクロンによる濃縮における凝集剤添加の効果

5.2 粉砕閉回路内のサイクロンを on-stream 粒度分析器として利用する方法

粉砕閉回路の主要目的の1つとして産物の粒度分布を一定に保つことがあげられるのは明らかである。従って粉砕閉回路を監視するためには、その産物(分級機オーバーフロー)の粒度を連続的に検出する必要がある。LYNCH らは粉砕閉回路内のサイクロンの機能を予め調査し、連続的に検出しやすい変数を測定することによって、オーバーフローの粒度を間接的に監視する方法を提案している。すなわち、実際の粉砕閉回路における条件下ではサイクロンの分級粒度 d_{50} とオーバーフローの -200mesh 含有率との間には1:1の関係が存在し、さらに d_{50} とサイクロンフィード流入圧 P およびサイクロンフィード

水量 WF との間には次の(12)式が成立することを指摘している。

$$\log d_{50} = \frac{P}{9.9} - \frac{WF}{52.5} + k \quad \text{.....(12)}$$

ただし、

P : [lb/sq. in. gauge]

WF : [t.p.h.]

k : サイクロンの出口径 d_o , d_u によってきまる定数

つまり、P および WF を連続的に測定して、サイクロンオーバーフローの粒度を監視する方法である。

6 あとがき

浮選研究会第40回例会における講演においては多くの図表にもとづいて説明を行なったが、ここでは紙面の都合上半数以上を割愛した。ただしそれらの資料はすべて末尾に掲げた参考文献から引用したものである。

本稿がサイクロン利用上の諸問題を実際の見地から整理するという点で、何らかのお役に立てば幸いである。

参考文献

- 1) 今泉常正：湿式サイクロンについて，選炭，Vol. 6 No. 24 (1956)，p. 90~104
- 2) 今泉常正：フルイ分け・分級・選別，1962年化学機械・装置年鑑，p. 117~129
- 3) И.И. Черный：Двухконусный гидроциклон，Цветные Металлы，1967 No.6，p.26
- 4) Г.Н. Долгалло и др.：Промышленные испытания двухконусного гидроциклона на ЦГО-Ке，Горный Журнал，1968 No. 1，p.50~51
- 5) Н.Ф. Мещеряков и др.：Опыт замены механических классификаторов комбинацией дугowych сит с гидроциклонами，Горный Журнал，1966 No. 6，p. 76~78
- 6) F. M. LEWIS et. al.：The Liquid-Solid Cyclone as a Classifier In the Closed-Circuit Grinding of Concentrates，Mining Engineering，June 1954，p. 620~621
- 7) M.J. DENNEY：Will Cyclones Replace Mechanical Classifiers?，Mining World，January 1954，p.45~47
- 8) D.F. KELSALL：Cyclone Applications Boom in Hydrometallurgy，Mining Engineering，October 1963，p.60~64
- 9) D. BRADLEY：The Hydrocyclone，Pergamon Press
- 10) В.В. Клячин：О разделении минеральных зерен в классифицирующем гидроциклоне，Цветные Металлы，1963 No.3，p. 14~17
- 11) В.В. Клячин：Граничная крупность разделения и производительность геометрически подобных гидроциклонов，Известия Вуз Горный Журнал，1964 No. 12，p. 142~148
- 12) Б.В. Клячин：О граничной крупности разделения гидроциклонов работающих при переменном давлении питания：Известия Вуз Горный Журнал，1966 No.10，p.168~170
- 13) 今泉常正：湿式サイクロンの分級性能について，日本鉱業会誌，Vol. 70，No.797 (1954年11月)，p.15~20
- 14) Ю.И. Никитин：Применение гидроциклонов для классификации пульпы с высоким содержанием твердого，Горный Журнал 1960 No. 11，p.64~66
- 15) H. P. WHALEY：The Milling Process，Mining Engineering，May 1963，p.43~47
- 16) 今泉常正，井上外志雄，岡野靖彦：ボールミル・サイクロン系の粉碎特性について，日本鉱業会誌，Vol. 82，No.935 (1966年3月)。——昭和41年度春季大会研究発表講演要旨集，p. 114~115
- 17) SCHUBERT：Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe-Band 1. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie，Leipzig，1964
- 18) H. H. DREISSEN，F. J. FONTEIN：Applications of Hydrocyclones and Sieve Bends in Wet Treatment of Coal，Minerals. and Mineral Products，Transactions SME，March 1963，p.101~107
- 19) D. KRAETSCH，G. PUSCH：Erfahrungen mit einer selbsttätigen Regelvorrichtung für Hydrozyklone，Bergakademie，19 Jg. Heft 6 (Juni 1967) p. 337~342
- 20) L.R. PLITT，E.O. LILGE：Hydrocyclone Thickening with Flocculants，Transactions SME，December 1967，p. 435~439
- 21) A.J. LYNCH，T.C. RAO，W.J. WHITEN：Technical Note on On-Stream Sizing Analysis in Closed Grinding Circuits，Proc. Aust. Inst. Min. Met，September 1967，p. 71~73.