

垂直円筒内の粒体流動と圧力損失に及ぼす 羽根列および偏向板の影響

影山 芳郎*・大坂 英雄*・山田 英巳*・羽野 茂浩**

The Effects of the Blade Cascade and Deflecting Plate on the Flow Pattern of Solid particles and Wall Pressure Drop in the Vertical Cylinder

Yoshiro KAGEYAMA, Hideo OSAKA, Hidemi YAMADA and Shigehiro HANO

Abstract

The flow pattern and the pressure drop in the fluidized and spouted beds were examined experimentally. Measurements of the pressure drop were made on the various angle β ($=30, 40, 50, 70$ and 90 degrees) of the blade cascade and the various angle α ($=0, 10, 20$ and 30 degrees) and the various height e ($=0, 10, 20$ and 30 mm) of the deflecting plate, and the flow patterns also have been observed by both the photograph and sketching.

The results of these experiments are as follows:

- (1) The flow patterns of solid particles show the "swirling" type flow when $\beta=30\sim70$ degrees, and the "parabolic" type flow only when $\beta=90$ degrees.
- (2) The pressure drop coefficient takes the minimum value when $\beta=90$ degrees and $\alpha=10$ degrees.

1. まえがき

流動化は、固体粒子と流体とを接触させて反応、乾燥、造粒などの単位操作を行なう方法であり、流動層と噴流層に大別される。流動化に伴い粒体を空気で輸送、攪拌する場合の圧力損失は所要動力を定める場合の基礎になるので、きわめて重要な問題である。したがってこの圧力損失に関して多くの研究^{1)~8)}が成されてきているが、個々の結果は異なる場合が多く、まだ体系づけられていない。本研究で扱う噴流層に限ってみても吹出口位置や噴流層容器の形状変化あるいは、旋回流の有無等が圧力損失に及ぼす影響についての研究はほとんど無いようである。

そこで本研究では、環状吹出しを行う石灰石粒子の噴流層について吹出口における旋回の量、および吹出口付近の偏向板の傾斜角度による粒体流動の変化と圧力損失の関係について調べた。

主要記号

x, r	: 羽根列部の上端面の塔中心を原点とする流れ方向および半径方向距離 (Fig. 1参照)
α	: x 軸から測った偏向板傾斜角度
β	: 水平面から測った羽根列傾斜角度
e	: 羽根列上端より測った偏向板の高さ
g	: 重力加速度
H	: 側壁面圧力水頭
ΔH	: 全圧力損失水頭, 式①
ΔH_a	: 気流のみによる圧力損失水頭
ΔH_p	: 付加圧力損失水頭
M	: 投入原料重量
Q	: 空筒風量
U_{cy}	: 空筒風速 ($=Q/\frac{\pi}{4}D^2$, $D=310$ mm)
ζ	: 損失係数, 式②

2. 実験装置および方法

実験装置は主に入口ノズル、試験部、ホッパー、分岐シュート、サイクロンおよび送風機部から成る。

* 機械工学科
** 大学院機械工学専攻

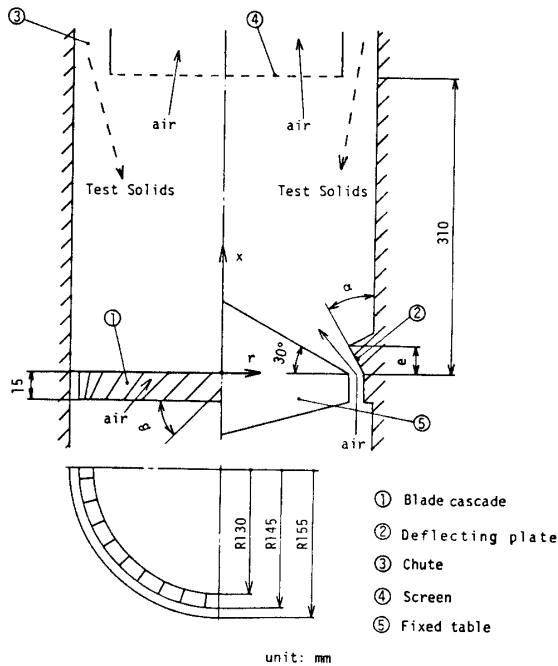


Fig. 1 Schematic view of apparatus, nomenclature and coordinates

Fig. 1は試験部の概略図と座標系を示したものである。試験部は内径310mm、肉厚10mmの内部が可視化できるアクリル樹脂管製で壁面圧力測定用の圧力孔（直径1mm）が羽根列上部に13箇所、下部に3箇所設けられている。また直径と高さの比が1となる位置に金網を設置した。気流は下方の入口ノズルより吸い込まれた後、試験部下側の羽根列を通して試験部へ流入する（Fig. 1の実線の矢印）。一方、粒体は上方のホッパーより投入された後、分岐シュートを通り試験部へと流入（Fig. 1の破線の矢印）し、前述の気流により混合、攪拌される。粒体は金網で試験部から流出しないように制限されるが、気流は金網を通り、試験部外へ流出する。

羽根列傾斜角度 β は30°, 40°, 50°, 70°, 90°の5種類、偏向板傾斜角度 α は0°, 10°, 20°, 30°の4種類、また偏向板高さ e は0, 10, 20, 30mmの4種類に変化させた。ただし $e=0$ mmは偏向板無しの状態を示す。羽根は厚さ3.2mmの平板翼で、羽根枚数は36枚の一定である。従って羽根傾斜角度 β が小さいほど羽根間通路幅は狭くなっている。なお羽根列の鉛直投影面積は $\beta \geq 50^\circ$ では零となる。中央部の固定テーブルの上面の傾斜角度は供試石灰石の安息角より30°とした。

実験には供試原料として粒径2~5mm、真密度2.7gf/cm³、みかけ密度1.43gf/cm³の石灰石粒子を用い、試験部への投入量は $M=1\sim 3$ kgfとした。壁面圧力分布と羽根列上下間の圧力損失の測定はゲッチングン型マ

ノメータにより行った。また内部流動状態の観察は目視および写真撮影により行った。

3. 実験結果および考察

3.1 羽根列の影響

ここでは羽根列の影響として、偏向板の傾斜角度 α を30°, 高さ e を30mmの一定に保った場合の羽根列傾斜角度 β による影響について調べた。

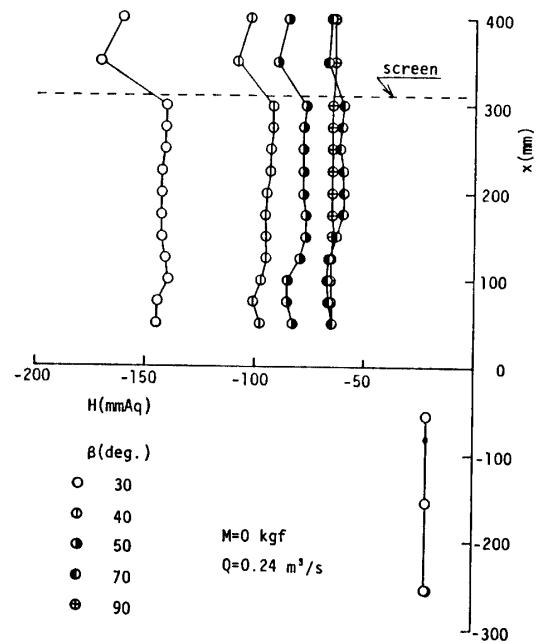


Fig. 2(a) Pressure distribution along the side wall

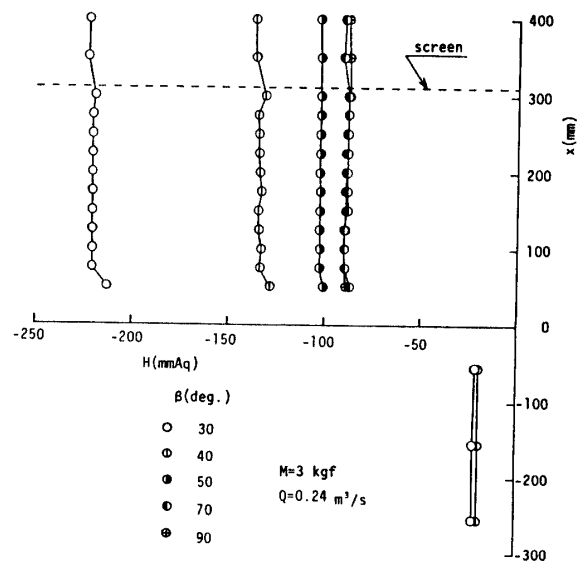


Fig. 2(b) Pressure distribution along the side wall

3.1.1 壁面圧力分布

Fig. 2(a)(b)は $M=0$ および $M=3\text{ kgf}$ における壁面圧力分布を β をパラメータとして示したものである。図中 $x=0$ の位置に羽根列があり、 $x=310\text{mm}$ の位置に金網を図示している。両図とも羽根列前後で大きな圧力差を生じている。これは羽根列部で流路が縮小・拡大されるためである。また β が小さいほど各羽根列間の流路幅が小さくなるため羽根列での縮小・拡大の割合は β が小さいほど大きく、圧力損失が大きくなっている。気流のみの場合 ($M=0\text{ kgf}$)、 $\beta=30\sim 70^\circ$ の羽根列に傾斜があるとき、羽根列の下流の圧力分布は平坦でなくふくらんでいる。また、このふくらみのピーク的位置は β の値が大きくなるとともに下流方向(上方)に拡大していく。これは羽根列の傾斜により空筒内で旋回流が起こっているためと思われる。 β の値が大きく、羽根列の傾斜が小さくなるほど旋回の強さが弱まり下流方向にこの旋回の強い領域が広がるためと考えられる。一方 $\beta=90^\circ$ の羽根列が垂直なときの圧力分布は流れ方向にほぼ平坦である。

次に供試原料を投入した場合 ($M=3\text{ kgf}$)、気流のみのときの $\beta=30\sim 70^\circ$ の圧力分布にふくらみは見られず、圧力分布は流れ方向にほぼ平坦となっている。これは空筒内の気流の旋回力が粒体を周囲の壁面に付着させるために消費されたこと、あるいは壁面近くに分布する粒体層によりこれを通った気流の一様化が促進されたためと考えられる。

両図とも $x=150\text{mm}$ 以上では圧力分布が平坦となり、縮小・拡大による圧力変化を生じていないことより以後羽根列部の圧力損失の測定には $x=150\text{mm}$ と $x=-155\text{mm}$ 間の差圧を用いることとする。

3.1.2 圧力損失

Fig. 3は $Q=0.24\text{ m}^3/\text{s}$ のときの β に対する羽根列部の圧力損失を示したものである。いずれの M の場合とも圧力損失は $\beta=30\sim 50^\circ$ では急激に、 $\beta=50\sim 90^\circ$ ではなだらかに指数関数的に減少している。

次に試験部で測定された差圧による全圧力損失 ΔH を気流のみによる羽根列の圧力損失 ΔH_a と粒体の流動による圧力損失である付加圧力損失 ΔH_p との和として定義すると

$$\Delta H = \Delta H_a + \Delta H_p \quad \text{①}$$

と書ける。Fig. 4は $M=3\text{ kgf}$ のときの風量 Q に対する付加圧力損失 ΔH_p を β をパラメータとして示したものである。 $\beta=30\sim 70^\circ$ の羽根列に傾斜がある場合、風量の増大につれ ΔH_p は大きくなり、またこの

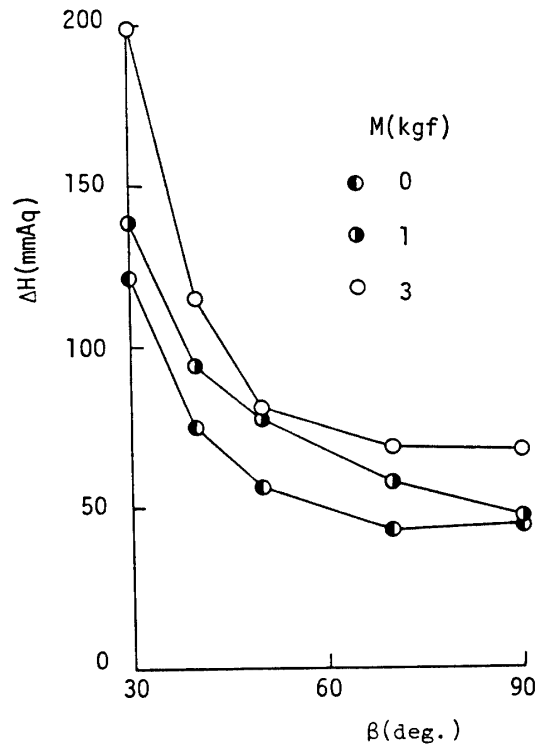


Fig. 3 Pressure drop across the blade cascade

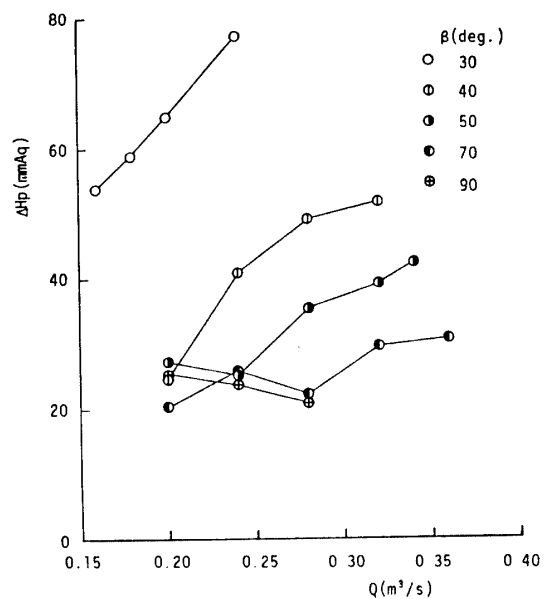


Fig. 4 Additional pressure drop

増加割合は β の値が小さいほど大きい。一方 $\beta=90^\circ$ の場合 ΔH_p の値は風量に対してあまり変化していない。これは $\beta=30\sim 70^\circ$ では粒体が層状を成し羽根列の上に覆いかぶさるようにして旋回しているため、この層の密集度は β が小さいほど大きい。 β が大きくなると旋回力が弱まり粒体の層は上方へと広がっていき羽根列上の粒体は密から疎な状態へと移っていく。

従って β が小さいほど流動化しにくく風量の増大とともに固定層状態から流動層状態へと移行^{3) 4) 5) 8)}していくため ΔH_p の勾配が急となっているものと考えられる。一方 $\beta=90^\circ$ の場合は羽根列上に粒体の層は無く、既に完全に流動化した噴流状態となっているため ΔH_p は風量に依存しなくなっているものと考えられる。

次に気流のみによる圧力損失 ΔH_a について調べてみる。圧力損失 ΔH_a は空筒風速 U_{cy} の2乗に比例するため次式のような損失係数 ζ が定義できる。

$$\Delta H_a = \zeta \frac{U_{cy}^2}{2g} \quad (2)$$

なお原料投入量を増加していくと U_{cy} の2乗からべき指数が小さくなり $M=3 \text{ kgf}$ のときにはいずれの β の場合ともほぼ U_{cy} の1乗に比例する結果が得られた。

Fig. 5は β に対する損失係数 ζ を示したものである。測定値より回帰分析を行うと ζ は、

$$\zeta = 63.94(\sin \beta)^{-3/2} \quad (3)$$

として表わされる。 ζ は β の値が大きくなるとともに指数関数的に減少し $\beta=70\sim 90^\circ$ ではほとんど一定値となっている。

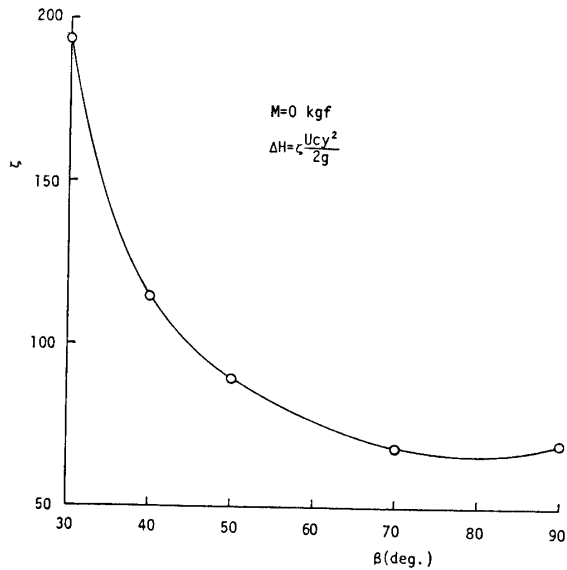


Fig. 5 Pressure drop coefficient

3.1.3 内部流動状態

試験部内部の粒体の流動状態を写真撮影および目視観察し、それをスケッチしたところ粒体の流動状態は β が 70° と 90° との場合で異なり次の2つのパターンに大別できることがわかった。

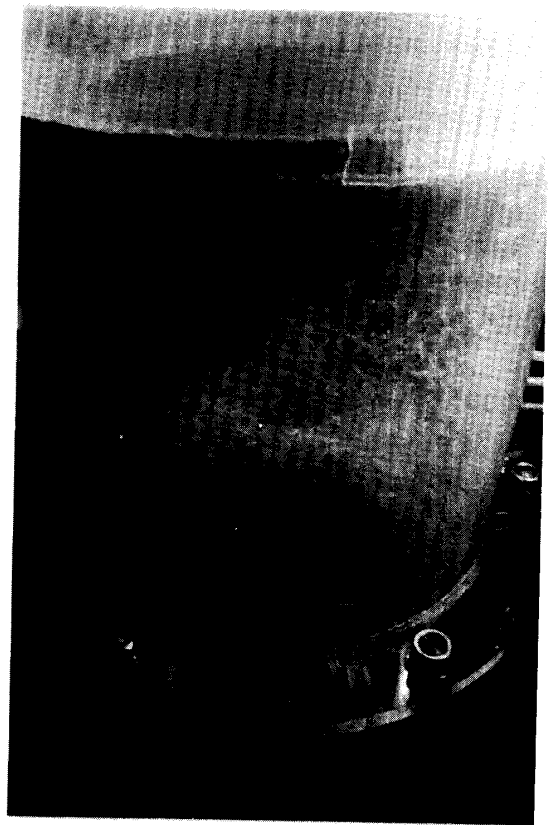


Fig. 6(a) Flow pattern for solid particles ($\beta=50, \alpha=30$ degrees)

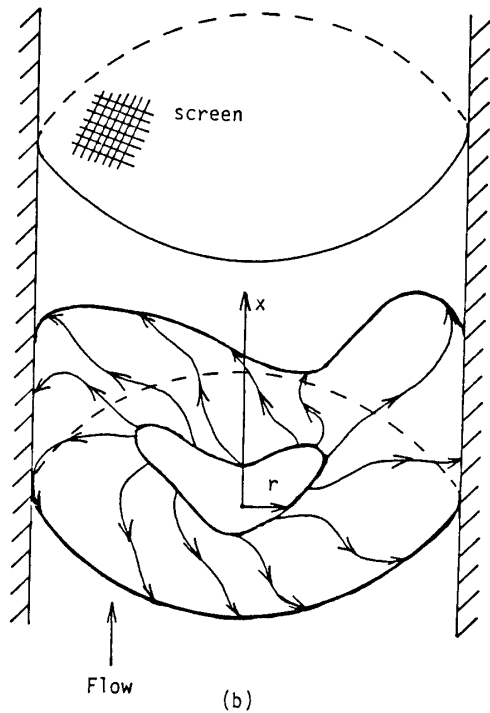


Fig. 6(b) Flow pattern for solid particles ($\beta=50, \alpha=30$ degrees)

- (i) 旋回流形……… $\beta=30\sim70^\circ$ の羽根に傾斜のあるもの
- (ii) 軸対称放物線流形… $\beta=90^\circ$ の羽根が垂直なもの

Fig. 6 (a) (b) は (i) の旋回流形の代表的例として $\beta=50^\circ$ の場合の写真およびスケッチを示す。

Fig. 6 (b) 中の矢印は粒体の主な動きを示している。羽根が傾斜しているため粒体に遠心力が働き、一方壁面によって粒体は外部への流出に制限を受けるため壁面に沿って旋回する。このため粒体は試験部の中心付近にはあまり存在せず壁面近傍の羽根列上に多く集まっている。この旋回は回転を含ません状旋回であり β の値が大きいくほど旋回力は弱まり吹き上げ状態に近づいていき粒体は壁面から中心部へと寄ってくる。

Fig. 7 (a) (b) は $\beta=90^\circ$ の場合を示したものである。羽根が垂直に立っているため環状噴流が形成され粒体は外周から吹き上げられ中心部へと落ちる軸対称放物線流形である。ただ中心部付近では対向した粒同志の衝突により外側へ曲げられたり下側へ落ちたりする複雑な動きを呈している。固定テーブル上には粒体が溜っておりこれは外周方向へと徐々に流れていき羽根列上部まで来ると再び上方へ吹き上げられるサイクルパターンを生じている。これより $\beta=90^\circ$ の場合

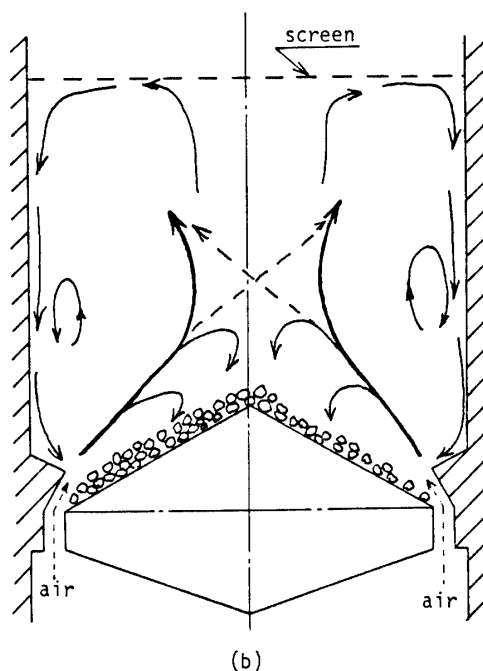


Fig. 7(b) Flow pattern for solid particles ($\beta=90^\circ$, $\alpha=30^\circ$)

粒体が中心部へよく集まることがわかる。全体的に見て (i) の旋回流形ではテーブル上に集まる粒体は少なく全ての粒体がらせん状旋回にとりこまれているが、(ii) の軸対称放物線流形では粒体の大半は固定テーブル上に集まり空筒内を流動している粒体の割合は少ない。しかし全ての粒体は静止しているのではなくわずかに移動している。

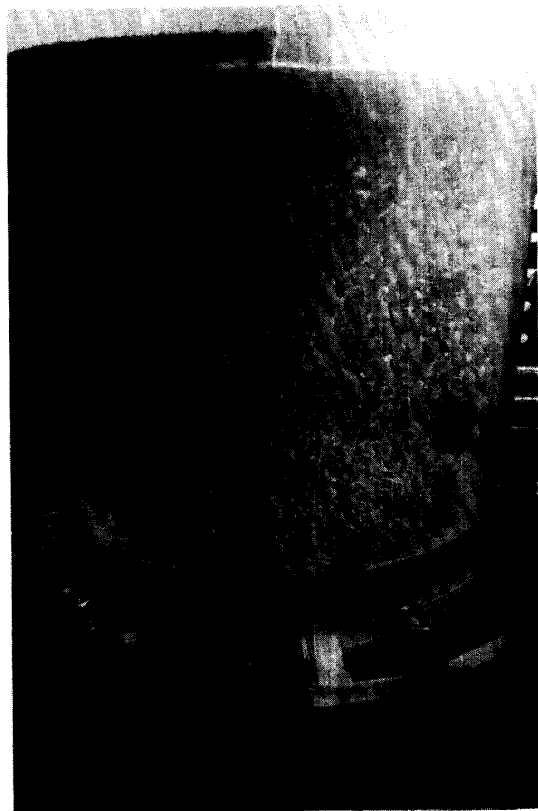


Fig. 7(a) Flow pattern for solid particles ($\beta=90^\circ$, $\alpha=30^\circ$)

3.2 偏向板の影響

前節の羽根列の影響の実験において $\beta=90^\circ$ が理想的と判断されたため、羽根列傾斜角度 β が 90° の一定のもとで偏向板傾斜角度 α およびその高さ e を変化させて測定を行った。なお、偏向板傾斜角度 α は $e=30\text{mm}$ の一定のもとで変化させ、また偏向板高さ e は各々 $\alpha=10^\circ$ および $\alpha=30^\circ$ の一定のもとで変化させた。

3.2.1 圧力損失

Fig. 8 (a) (b) は $Q=0.24\text{m}^3/\text{s}$ のときのそれぞれ α および e に対する圧力損失の変化を示したものである。Fig. 8 (a) をみると $M=0, 1\text{kgf}$ では $\alpha=10^\circ$ のとき圧力損失 ΔH は極小値をとり、 $M=2$ および 3kgf では分布はなだらかな右上り曲線で $\alpha=0^\circ$ のとき最も小さくなる。次に Fig. 8 (b) をみると $\alpha=30^\circ$ の気流時のものを除いて圧力損失 ΔH のピークが $e=20\text{mm}$ 付近にある類似の山形の分布形状となっている。こ

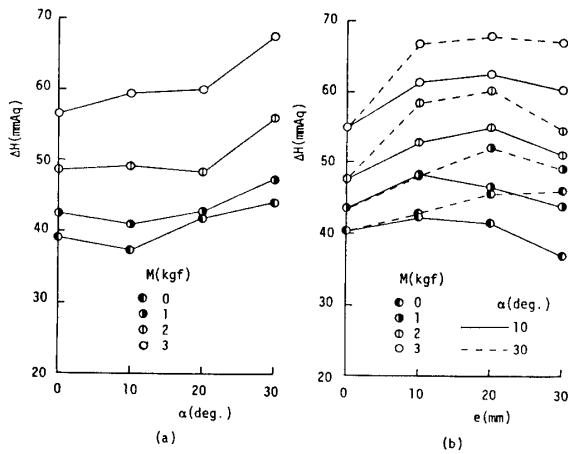


Fig. 8 Pressure drop

これは偏向板と羽根列部の流路外壁との接点のコーナ部および偏向板背後における剥離泡に関するものと思われる。すなわち $e \leq 20$ mm の範囲ではコーナ部で生じた剥離泡が偏向板上で再付着せず偏向板背後の領域まで含む剥離泡を形成し、一方 $e \geq 20$ mm の範囲ではコーナ部で生じた剥離泡が偏向板上に再付着するため偏向板背後で生じる剥離泡は前者のものほど大きくないものと思われる。しかし e の値が 30 mm より大きくなるにつれ偏向板背後の剥離泡は次第に大きくなり、 ΔH_p は再び増加傾向を示すものと予想される。 $\alpha = 30^\circ$ の場合は $\alpha = 10^\circ$ の結果に比べてコーナー部で生ずる剥離泡が大きく $e = 30$ mm でも剥離泡が再付着するのに十分大きな高さとはいえない。しかし原料が投入されると固定テーブル上に粒体が溜り流路が縮小されるため実質的な偏向板傾斜角度は 30° より小さくなるためコーナー部で生ずる剥離泡が小さくなるものと考えられる。

次に付加圧力損失 ΔH_p について述べる。Fig. 4 に示したように $\beta = 90^\circ$ の場合、風量 Q の変化に対して付加圧力損失 ΔH_p はほぼ一定であるため各風量時の測定値を平均して求めた ΔH_p を α および e に対して示したものが Fig. 9 (a) (b) である。Fig. 9 (a) をみると偏向板傾斜角度 α が 0° より大きくなるとともに ΔH_p は右上りに上昇し $\alpha = 10 \sim 20^\circ$ の間で ΔH_p はいずれの M についても減少している。これはこの α の付近で内部流動状態が変化しているためと予想される。Fig. 9 (b) をみると $\alpha = 30^\circ$ の場合、いずれの M の場合とも分布形状は山形となっている。これは偏向板高さ e が大きいほど羽根列部の局所流速は大きく $e = 10 \sim 20$ mm で流動化が進み局所的に噴流層の状態になっているためと考えられる。 $\alpha = 10^\circ$ の場合はいずれの M の場合とも e が大きくなるとともに ΔH_p は

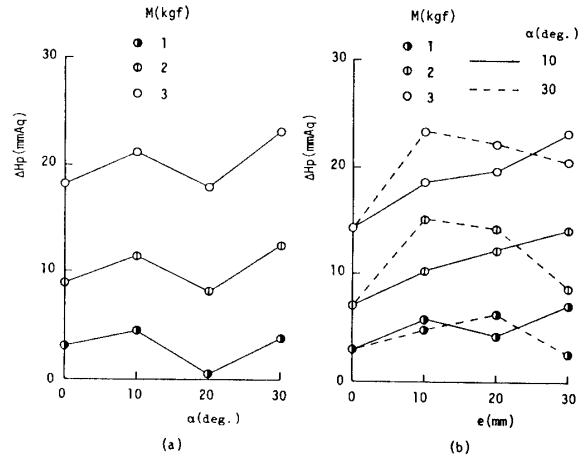


Fig. 9 Additional pressure drop

単調に増加している。これは $\alpha = 10^\circ$ の場合、 $e = 30$ mm でもまだ噴流層の状態に達していないためと考えられる。 $\alpha = 10^\circ$ の $e = 30$ mm と $\alpha = 30^\circ$ の $e = 10$ mm の ΔH_p の値がほぼ等しい結果を示しているが、これは羽根列部を上面より見たとき両者の偏向板が羽根列部を覆う割合(投影面積)が等しいことによるものと考えられる。これより $\alpha = 10^\circ$ では $e = 30$ mm で ΔH_p がピークとなり、 $e > 30$ mm では ΔH_p は減少すると予想できる。

次に気流のみの場合の損失係数 ζ について述べる。気流圧力損失 ΔH_a は U_c の 2 乗に比例するので②式より損失係数 ζ を算出した。Fig. 10 (a) (b) は α および e に対する ζ の変化を示したものである。 α に対して ζ は $\alpha = 10^\circ$ に極小値をもつ下に凸な分布となっている。 e に対する ζ の分布は $\alpha = 10^\circ$ の場合 $e = 10 \sim 20$ mm にピークをもつ山形の分布形状であり、一方 $\alpha =$

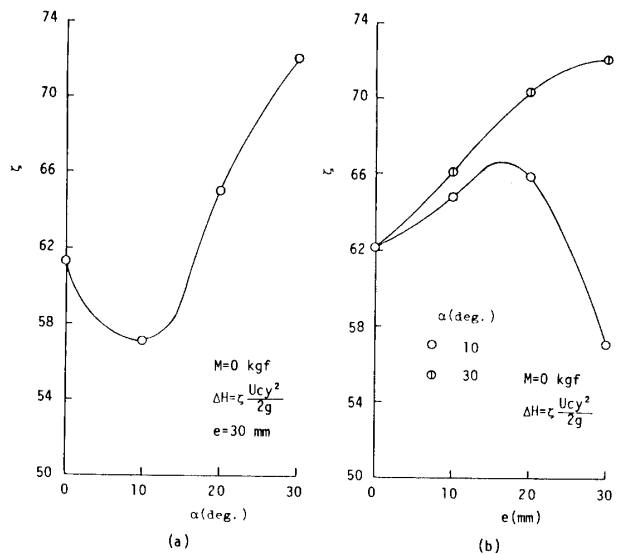


Fig. 10 Pressure drop coefficient

30°の場合には e が大きくなるとともに ζ は単調に増加している。これは前述したように偏向板と流路外壁とのコーナ部における剝離泡の大きさが $\alpha=10^\circ$ の場合 $e=20\text{mm}$ 付近でほぼ最大となるため、一方 $\alpha=30^\circ$ の場合 ζ の最大値は e が 30mm より大きいときに生じると予想されるためである。

3.2.2 内部流動状態

α の変化による粒体の内部流動状態は、 $\alpha=0\sim10^\circ$ と $\alpha=20\sim30^\circ$ との2つに大別される。前者は理想的な軸対称放物線流形で、後者は中心部分で交差する対向流形である。Fig. 11 (a) (b) は $\alpha=10^\circ$ のときの粒体の流動状態の写真およびスケッチを示したものである。 $\alpha=30^\circ$ のときの流動状態は既にFig. 7 (a) (b) で示している。 $\alpha=10^\circ$ の場合羽根列部より吹き上った粒体はほぼ垂直に上昇し中心部へと落ちる理想的な流動状態である。側壁面近傍には粒体がほとんど存在しない死水領域がみられる。これより側壁面に当たる粒体が少ないため騒音が低く、壁面が損傷されにくい。 $\alpha=30^\circ$ の場合偏向板の傾斜が大きいため過度に気流が曲げられ、粒体は中心部付近で交差した後対向側壁面に直接当たり、その後壁面に沿って落ちる傾向

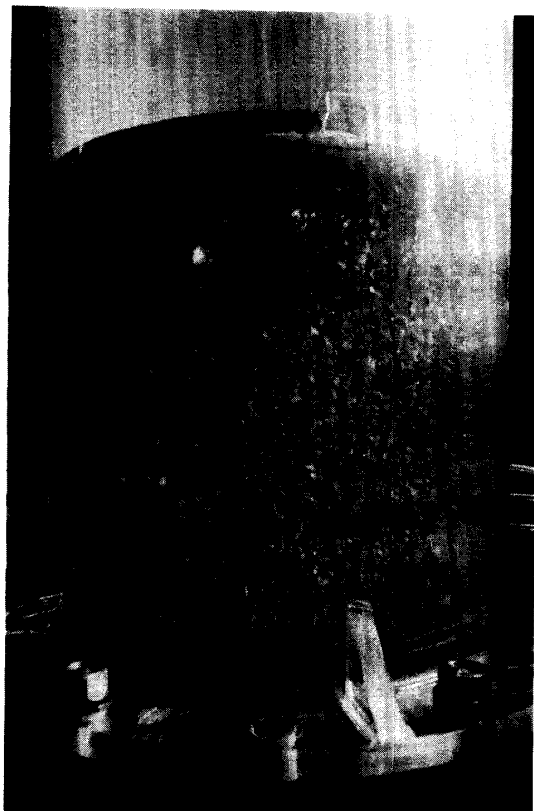


Fig. 11(a) Flow pattern for solid particles ($\beta=90^\circ$, $\alpha=10^\circ$)

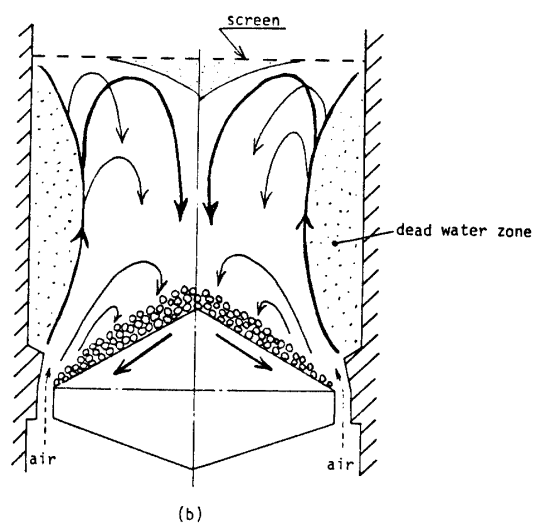


Fig. 11(b) Flow pattern for solid particles ($\beta=90^\circ$, $\alpha=10^\circ$)

を示す。中心部の交差領域より低い粒体は固定テーブル上に落ちている。

偏向板高さ e の変化に対しては、内部流動状態に顕著な変化は認められなかった。

4. 結論

環状気流吹出しを伴う垂直円筒内における石灰石の流動状態に関し、羽根列および偏向板の変化による圧力損失の測定および粒体の内部流動状態を調べた結果、以下の事が明らかとなった。

1. 粒体の内部流動状態は、 $\beta=30\sim70^\circ$ の旋回流形と $\beta=90^\circ$ の軸対称放物線流形の2つに分けられる。また気流損失係数 ζ は β が大きいほど指数関数的に減少し、 $\beta=90^\circ$ のとき最小となる。
2. $\beta=90^\circ$ の場合、粒体の内部流動状態は $\alpha=0\sim10^\circ$ と $\alpha=20\sim30^\circ$ との2つのパターンに大別できる。特に $\alpha=0\sim10^\circ$ のとき壁面付近に死水領域が存在し、壁面の損傷軽減と騒音抑制に有利である。また気流損失係数 ζ は $\alpha=10^\circ$ のとき最小となる。
3. $\beta=90^\circ$ の場合、 $\alpha=10^\circ$ あるいは $\alpha=30^\circ$ の一定のもとで、偏向板高さ e を変化させた場合、内部流動状態に顕著な変化は認められない。なお気流損失係数 ζ は本実験の範囲内では $\alpha=10^\circ$ 、 $e=30\text{mm}$ のとき最小となるが、より高い e についての検討が必要である。

文 献

- 1) 植松・森川：機論，**26**，176 (1960)
- 2) 植松・他5名：機論，**30**，1317 (1964)
- 3) 横川：機論，**35**，1903 (1969)
- 4) 横川：機論，**36**，365 (1970)
- 5) 横川：機論，**36**，375 (1970)
- 6) 上滝・他3名：機論，**43**，1822 (1977)
- 7) 富田・他2名：機論 (B編)，**49**，1434 (1983)
- 8) 早野・他2名：山口大学工学部研究報告，**27**，235 (1977)