針状粒子のふるい分けにおける分離径の推定

内海良治*, 市川正美*, 山本哲夫*
畑孝義*, 宇敷建一*

Estimating the Cut Size of Needle-shaped Particles During Sieving

by

Ryoji UTSUMI[†], Masami ICHIKAWA[†],
Tetsuo YAMAMOTO[†], Takayoshi HATA[†]
and Kenichi USHIKI[†]

The cut size of the length of needle-shaped particles during sieving by a plain woven wire cloth was investigated. The cut size was theoretically estimated on the basis of the geometrical relationship between the particle and wires making up the sieve aperture. Three critical cases for particle passing were shown, and the critical particle length was derived for each case. Five kinds of enamel wire having different lengths were used as a model of needle-shaped particles, and the particles were sieved by a horizontal impulse acting on the sieve. The sieving rate increased with decline in the particle length. It was found that a critical length at which the sieving rate extremely decreased existed, and the length could be estimated by the critical models.

Key Words : Needle-shaped Particle, Cut Size, Sieving, Woven Cloth

1. はじめに

ふるいによる粒度分級は技術的にも理論的にも、かなりよく解明されているが、そこで対象とされている粒子は球形またはそれに近い粒子であることがほとんどである。しかしながら、一般的には粒子が球形であることはまれであり、非球形粒子の場合にはまだまだ課題が多い。実際の課題を考えると、一旦球形粒子から離れ、非球形粒子からふるい分けを考えるのも一つのアプローチではないかと考えられる。

本研究は、球形モデルとは全く違った針状粒子をモ

デルとし、ふるいによる分離径、すなわち長径に基づく分離径の計算方法を確立することを目的としている。ここで針状粒子とは、短径が長径方向に変化しない、すなわち太さ一定で短径よりはるかに長い長径を有する粒子を意味している。

粒子の形状に注目したふるい分けに関する研究は、あまり見られないので、はじめにこれらを概観する。橋本¹⁾は鋳物砂とガラス球を用いて、ふるい分け時の変異の現れ方について研究し、形状による実用上の差はないと結論している。Alex²⁾は、ふるい分けを含めた4つの粒度分析をガラス繊維を含めた6つの粒子について行い、針状粒子のふるい分けが最も精度が悪いと述べている。Robertsら³⁾は3種類の銅粉のふるい分けを行い、不規則形状ほど目詰まりが少ないことを示した。遠藤ら⁴⁾は円筒粒子のふるい分け速度の法則性について研究した。更に柴田ら⁵⁾はふるい分け速度に及ぼす粒子の形状の効果について研究し、形状によ

平成4年8月6日 受付

化学工学会 第56年会(1991年3月, 東京)にて発表

粉体工学会 第25回技術討論会(1990年6月, 東京)にて発表

* 名古屋工業技術試験所(〒462 名古屋市北区平手町)

TEL 052-911-2111 (内線 150)

[†] Government Industrial Res. Inst., Nagoya

Agency of Industrial Sci. and Tech.,

(Hirate-machi, Kita-ku, Nagoya 462)

って粒子通過確率が影響を受け、規則性のある粒子が目詰まりを起こし易いことを確かめた。また岩田⁶⁾は傾斜振動ふるいによる形状分離法とMeloy⁷⁾のふるいカスケードグラフによる形状分布測定法を紹介している。しかしながら実際に非球形粒子の分離径を追求し、数値化しようとした研究は極めて少ないが、最近、繊維状エアロゾル粒子のふるいによる分級を試み、金網で繊維長さの分布を調整できることを示した明星^{8,9)}の研究がある。

本研究では、針状円柱粒子の分離径を幾何学的に求め、エナメル線を切断して作成したモデル粒子を使って、その妥当性を実験的に検討した。ここではその結果について報告する。

2. 実験

針状粒子としては、直径 $317\mu\text{m}$ のエナメル線を切断し、Table 1に示す5種類の長径を持つ粒子を作成した。その形状をFig. 1に示す。端面は仕上げていない。ふるいとしては呼び寸法 $381\mu\text{m}$ 、枠径 75mm の網ふるいを使用した。一部の実験では呼び寸法 $850\mu\text{m}$ のふるいも使用した。それらの特性をTable 2に示す。

粒子の長軸が網面に直角になれば、原理的に考えて短径でふるい分けられることになる、用いた粒子はすべて網を通過することになる。そこで、長径でふるい分けを行うために、粒子が立ち上がらないように水平方向の衝撃を加えることができるFig. 2に示す実験装

Table 1 Properties of cut enamel wire particles

No.	Average length	Deviation	Elongation ratio	Particle length Sieve aperture*
1	1.03mm	0.170mm	3.01	2.76
2	2.06	0.171	6.49	5.53
3	3.08	0.189	9.72	8.26
4	5.00	0.140	15.8	13.4
5	10.13	0.209	31.9	27.2

Diameter of enamel wire : $317\mu\text{m}$

* Average of sieve apertures : $372.8\mu\text{m}$

Fig. 1 Shape of particles

Table 2 Properties of sieves [μm]

Nominal size of aperture	381	850
Average of apertures	372.8	852.4
Deviation of apertures	5.44	8.59
Maximum of apertures	428.5	899.5
Average diameter of wire	254.9	518.7

Frame diameter : 75mm

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus

置を用いてふるい分けを行った。ふるいは受け皿及び蓋と共にトロツコに乗せて固定されている。トロツコ、ふるい、受け皿及び蓋の合計質量は 1205g である。衝撃力はバネばかり(バネ定数 350N/m)を使って与えられる。粒子の投入量は長径一定の単分散粒子を使う場合には約 1g とした。多分散粒子はTable 1中の1, 3, 5および 10mm の長径の粒子、各 1g を混合したもので、この場合には約 4g を投入した。投入に際しては粒子が網面に垂直に立たないように注意した。また、ふるいは衝撃を10回加える度に 90° 度回転させた。ふるい網の目開きの方向と衝撃の方向に関しては、特別な注意は払っていない。また、バネばかりの代わりに、モーターを利用した水平方向単振動による実験も行った。多分散粒子のふるい下物の粒度分離は、各長径を明確に視覚的に分離できるので、手操作によって行った。

3. 分離径の算出

針状粒子を直径 s 、長さ L の円柱形であると仮定する。また、ふるいを目開き W 、網の金属線(以降、網線と略す)の径 D 、ピッチ p とする。粒子は網面上で面に平行な加速度のみを受け、網上を滑りながら運動すると仮定する。ふるいの網線の断面は円形状であるとみなすと、粒子が2本以上の網線にまたがって乗っているとき安定していると考えられるが、運動によって粒子の長さの半分以上の部分が網線からはみ出したとき、その網線との接点を支点とした力のモーメントを受けてバランスを崩し、ふるい網を通過しようとする。

粒子は網上で種々の方向を向いているため、粒子の長軸と網線の方向は一定の角度をなしていない。しかし、ここでは問題を簡単化するため、粒子の長軸と、粒子と接する網線の軸は水平面内で直交すると仮定する。更に、バランスを崩した粒子は、2次的にみて粒子の端面の上端が網線の円周面に直角に接触した状態を境にして、それより下がれば網目を通過すると考える。このような限界状態として、Fig. 3に示すような3つの特異なケースを想定する。いずれの場合も、粒子は1本の網線と接して力のバランスを崩し、隣の網線と接触して、摩擦で支えられている状態を考えている。各ケースは次のようである。

ケース 1：粒子が網目の中央を通過すると考えた場合で、目を構成する2本の網線はふり面上の同じ高さにあると仮定する。

(a) Case 1

(b) Case 2

(c) Case 3

Fig. 3 Critical cases for a needle-shaped particle passing through the sieve aperture

ケース 2：粒子が目端に近いところを通過する場合である。この場合には、2本の網線はクロスする網線にたいして上側と下側へそれぞれ偏まれるので、ふり面の平均高さに対して、それぞれ上と下で接する位置にあると仮定する。

ケース 3：ケース 2 の位置において粒子が2隣の網線との接触によって制限される場合である。これはケース 1 の場合において、粒子が O_1 の網線から滑り落ち、 O_3 の網線によって制限される場合で、この場合には長さはケース 1 で p を $2p$ とすればよいが、通過できる短径(太さ)が制限される。

上の3つのケースに相当する粒子の長さを各ケースの粒子の分離限界長さとする。

Fig. 3から、各ケースの粒子の分離限界長さを求める。いずれの場合にも、図の網線の円周上の頂点からバランスを崩し、回転しながら滑り落ちてちょうど点Aで横の網線に接している状態であるから、粒子の長径の最大値は

$$L = 2(\overline{AB} + \overline{FT}) \quad (1)$$

であると考え。したがって、問題は $\overline{AB}$ および $\overline{FT}$ を求めることである。これらを図から求めると、

ケース 1 の場合：

$$\overline{AB} = \{p^2 - (s + D/2)^2\}^{1/2} - D/2 \quad (2)$$

$$\overline{FT} = (D/2) \sin^{-1}\{(s + D/2)/p\} \quad (3)$$

ケース 2 の場合：

$$\overline{AB} = \{p^2 + D^2 - (s + D/2)^2\}^{1/2} - D/2 \quad (4)$$

$$\overline{FT} = (D/2) \{ \sin^{-1}(s + D/2)/(p^2 + D^2)^{1/2} + \tan^{-1}(D/p) \} \quad (5)$$

ケース 3 の場合：

$$\overline{AB} = \{4p^2 - (s + D/2)^2\}^{1/2} - D/2 \quad (6)$$

$$\overline{FT} = (D/2) \sin^{-1}\{(s + D/2)/(2p)\} \quad (7)$$

$$s = D \left\{ \frac{2p}{(p^2 + D^2)^{1/2}} - 1 \right\} \quad (8)$$

4. 実験結果と考察

4.1 単一長さの粒子による実験

衝撃回数 N に対する累積ふるい分け量を、目開き $381\mu\text{m}$ のふいで調べた結果の一例をFigs. 4, 5および6に示す。これからわかるように、いずれの試料でも衝撃回数20回くらいまでは、衝撃力の大きさによってふるい分けの進行はかなりばらついているが、パネの力が9.81N以上では進行過程はかなり一致すると

Fig. 4 Variation of fraction of particles passing through the sieve with the number of impulses (particle length : 1 mm)

Fig. 5 Variation of fraction of particles passing through the sieve with the number of impulses (particle length : 3 mm)

Fig. 6 Variation of fraction of particles passing through the sieve with the number of impulses (particle length : 5 mm)

見なせる。ふるいの目開きの方向、粒子の配向などに特別な配慮をしていないことと、ふるい目に粒子が来る姿勢が確率的であるため、衝撃回数が少ないところ

でばらつきが現れたものと思われる。また衝撃力の小さいところ(バネの力2.94N以下)では粒子の動きが小さいため、ふるい分けの進行が遅くなっているものと思われる。ふるい分けの進行が安定する衝撃力は、粒子の長さによって異なり、長さ3mmの粒子ではバネの力が2.94Nの場合に遅くなっているが、長さ10mmの粒子では4.90Nの場合に遅くなり、5mmの場合にはその中間である。すなわち、長径が小さいほど小さい衝撃力でふるい分けることが可能であると言える。

次に、ふるい分けの進行が安定していると見なせる衝撃回数40回の場合について、粒子長さに対するふるい通過量を、バネの力をパラメータとしてFig. 7に示した。これから、例えばバネの力1.96Nで衝撃を加えると、長さ3mm以上の粒子はまったくふるいを通していないことがわかる。バネの力9.81Nでは、長さ5mmの粒子も10mmの粒子も、ふるい通過量はあまり変わらない。これは衝撃力が強すぎて、Fig. 3に示した3つの通過ケースに加えて、粒子が飛び上がり、粒子の長軸がふるい面に垂直に近い状態になるものがでてくるためではないかと思われる。また、バネの力が9.81Nの場合、2mm以下の粒子の場合も当然飛び上がる状態のものが含まれていると思われるが、そのふるい通過速度は3mm以上の粒子に比べて急激に速くなっている。このように、ふるい分け速度が明白に異なることから、衝撃による粒子の長径による分離が可能と考えられる。また、粒子の飛び上りを小さくする、分離に適した衝撃力が存在するものと思われる。各実験条件に対して、先に示したケース1～ケース3の粒

Fig. 7 Percent of particles passing through the sieve for 40 impulses by spring

子の分離限界長さを計算し、その結果をFig. 7に示した。この結果から、長径の分離径はケース2よりやや大きいところにあると考えられる。

ここで、衝撃力によるトロッコの速度を概算してみる。ここでは簡単のためにトロッコの摩擦はなく、バネの衝突エネルギーの損失はないものと仮定する。バネ定数 k 、衝撃を与えるときのバネの力 f 、トロッコ系の合計質量 M 、その速度 V とすると、エネルギーバランスから次式を得る。

$$V = \frac{f}{(kM)^{1/2}} \quad (9)$$

これよりトロッコの速度は、バネの力が19.6Nで95cm/s、1.96Nで9.5cm/sであることが求められる。

4.2 多分散粒子による実験

実際の粒子は多分散状であることが一般である。そこで、4.1節で検討した長径の分離径が多分散粒子でも当てはまるか調べてみた。多分散粒子はTable 1の中の1,3,5および10mmの粒子各1gを混合したもので、ふるい上に4gを投入して衝撃力によるふるい分けを行った。衝撃回数に対するふるい分け進行過程を、各長さの粒子に分離してFig. 8に示した。使用したふるいは、呼び寸法381 μ mのものである。これより、1) 10mmの長さの粒子は、いずれのバネの力による衝撃でもふるいを通していないこと、2) それ以外の長さの粒子も衝撃力が弱いと、ふるい分けの進行が遅い

Fig. 8 Sieving process of mixed particles and those of separated particles in each length (mixed particles : mixture of 1 g each of particles with the length of 1, 3, 5 and 10mm in length)

こと、などがわかる。

これからFig. 7と同様に、衝撃回数40回の時点において、粒子の長径に対するふるい通過量をプロットするとFig. 9のようになった。これより、やはり長径に対する分離径がケース2よりやや大きいところにあることがわかった。

これまで示してきた実験結果は、いずれもバネによる衝撃力を利用したふるい分けであり、粒子が網上で立ち上がることが考えられた。そこで、同じ多分散粒子を使って、バネの代わりにモーター・クランクによる水平単振動のふるい分けを行ってみた。振動数4Hz、振幅2.1mm、全振動回数1000回の結果をFig. 10に示す。この条件を衝撃力による場合と比較してみる。衝撃力の場合には加速度を測定していないので、速度で比較すると、振動の場合は単振動の運動方程式から計算でき、最大速度5.28cm/sとなりかなり遅い。ちなみに最大加速度は132cm/s²と計算できる。このように運動条件はかなり異なるが、この場合にもやはりケース2よりやや大きいところに分離径があると判断することができる。

次に、粒子の短径とふるい目開きの関係を変えた場合について検討した。粒子は同じ多分散粒子とし、呼び寸法850 μ mのふるいを使い、バネの衝撃力によるふるい分けを行った。その結果を計算結果と併せてFig. 11に示す。バネの衝撃力は1.96Nである。これでも

Fig. 9 Percent of particles passing through the sieve for 40 impulses by spring (mixed particles)

Fig. 10 Percent of particles passing through the sieve for 1000 times of vibration by crank system (mixed particles)

Fig. 11 Percent of particles passing through the sieve for 40 impulses by spring (mixed particles)

5mm以下の粒子で、ふるい分け量が急激に多くなっており、ケース2の分離限界長さよりやや大きいところに分離径があると判断できる。

4.3 ケース3の短径による考察

これまでの実験結果から、水平振動ふるいによる針

状粒子の長径の分離径は、粒子の通過モデルのケース2の分離限界長さよりやや大きいところにあると考えればよいことが明らかになった。

ここでもう一度Fig. 3のバランス図を振り返ってみる。ケース3の場合、ふるいの網線 O_1 と O_2 の両方に接触して滑り落ちる場合、粒子の短径 s が制限されることを述べた。そこで、Eq. (8)によって短径を計算すると、次のようである。

$$\text{ふるい } 381\mu\text{m} : s = 217.4\mu\text{m}$$

$$\text{ふるい } 850\mu\text{m} : s = 451.6\mu\text{m}$$

ここで使用した粒子の短径は317 μm であるので、381 μm のふるいの場合には、ケース3の状態では粒子は通過できないことになる。また850 μm のふるいの場合には、粒子は通過できる短径よりも細いので、ケース3を十分に配慮することが必要となる。これをFigs. 9, 10および11から評価してみる。381 μm のふるいを使った場合、Fig. 9でバネの力4.90Nで長径5mmの粒子もかなり通過しているが、他の条件では5mm以上の粒子はふるい分け速度が非常に遅い。バネの力4.90Nの場合、粒子が飛び跳ねている可能性があると考え、そのデータを除外でき、ケース2に近いところに分離径があると考えることができる。また、850 μm のふるいを使った場合、バネの力が小さい時の実験結果(Fig. 11)でも、ケース3に相当する5mmの粒子がかなり通過している。

このようことから、分離径はケース2の限界分離長さよりやや大きいところにあると考えられる。このケース2との差は、モデルを作るときに、粒子の長軸が網線と直交すると仮定したことから生じたと考えられる。実際には、網面上で網線と斜めに交差している粒子が大部分である。しかしながら、第一次的な近似としては、まずケース3における短径を境にして、粒子がそれより大きい短径の場合にはケース2を、小さい場合には、ケース3を分離径とできると考える。

5. まとめ

非球状粒子の一つとして、針状粒子を対象にしたふるい分けによる長径に基づく分離の可能性について調べた。ふるい分け方法としては、水平衝撃または水平振動によるものとし、粒子の長軸は運動するときも常に網面に平行であると仮定した。粒子がふるいを通して3つのモデルケースについて分離限界長さを求め、その妥当性を実験的に調べた。その結果、次のような結論を得た。

1) 粒子のふるい分け速度は、粒子の長径が小さいほ

ど速いが、ふるい分け速度が明らかに遅くなる長径が存在する。また、粒子の長径の大きさにより、ふるい分けに必要な衝撃力の大きさは変わり、長径が大きくなるほど大きくなる。

2) Eqs. (1)から(8)に示した粒子がふるいを通過する3つのケースのうち、ケース2の分離限界長さよりやや大きいところに分離径が存在する。第一次的な近

似としては、粒子がケース3の通過可能な短径より大きい場合には、ケース2により、また小さい場合にはケース3により分離径を求めることができる。

なお、1)にも記したように、粒子の長径でふるい分けを行う場合、最も適した衝撃力または加速度が存在することが明らかになったが、その大きさについては追求しなかった。今後の課題である。

Nomenclature

$\overline{AB}$	: distance(see Fig. 3)	(m)	M	: total mass of truck system	(g)
$\overline{FT}$	: arc length(see Fig. 3)	(m)	N	: number of impulses	(-)
D	: diameter of sieve metal wire	(m)	p	: pitch of sieve aperture	(m)
f	: spring force	(N)	s	: breadth of diameter of particle	(m)
k	: spring constant	(N/m)	V	: velocity of truck	(m/s)
L	: particle length	(m)	W	: sieve aperture	(m)

References

- 1) Hashimoto, K. : *Reports of Gov. Ind. Res. Ins., Nagoya*, 4, 529(1955)
- 2) Alex, W., : *Aufbereitungs-Technik*, 25, 415(1984)
- 3) Roberts, T. A. and J. K. Beddow : *Powder Technol.*, 2, 121(1968/69)
- 4) Endo, S., J. Koga and K. Yamaguchi : *J. Soc. Powder Technol., Japan*, 20, 8(1983)
- 5) Shibata, T., S. Nakayama and K. Yamaguchi : *J. Soc. Powder Technol., Japan*, 25, 615(1988)
- 6) Iwata, H., : *Sigen*, 3, 446(1991)
- 7) Clark, N., T. E. Durney and T. P. Meloy : *J. Powder & Bulk Solids Technology*, 8, 21(1984)
- 8) Myojo, T. and N. Kohyama : *J. Soc. Powder Technol., Japan*, 27, 804(1990)
- 9) Myojo, T : *J. Soc. Powder Technol., Japan*, 28, 495(1991)