研究報告

粉体流出時における脈流現象について*

On the Pulsating Flow of Cu-powder through an Orifice

丹野 浩一**

Kōichi Tanno

高橋 藤雄**

Fujio Takahashi

菊田 貞雄**

Sadao Kikuta

中村 三郎**

Saburō Nakamura

1. 緒言

粉末冶金製品は近年、広く各分野に応用され、その進出は著しいものがある。しかし焼結工程中の圧粉体個々には密度および寸法に画一性がなく均一な精度の圧粉体を作ることは非常に困難である。最近、焼結材の性質や焼結技術そのものについては目覚ましい発展をしてきているが圧粉体の均質化については粉の持つ物性、および二次的に派生する流動度について研究をする必要がある。粉粒体の流動度については従来、化学工学を始めとして化学肥料や穀類など諸物性に影響されやすい有機物質について多く研究¹⁻⁶⁾されてきたが流動度を結論づけるほどには未だ至っていない。そういった意味から最近では流動各部における流動機構について解析する研究が多くなっている。粉末冶金においても粉体をダイへ充てんする際、ホッパーからの排出流の状況が問題となり、その排出流の不均一性は製品の定量化および自動化の妨げとなっている。排出時の不均一流の原因は排出孔直上部に形成する架橋現象によるものであるがその測定には高速度カメラによって間接的に観察した方法⁷⁻⁸⁾はあるが流動時の架橋現象を直接的に観察した例はない。本研究では排出流の不定脈流の状態を直接的に観察する方法として粉粒を粘着テープに固着指示させる方法を採用し、オリフィス径、オリフィス厚などが脈流に及ぼす影響を観察した。

2. 装置および実験方法

2.1 装置

実験に使用した脈動流装置は図1に示すとおりである。④のガラス管容器底部に取りつけた真ちゅう製オリ

フィスは三脚台に水平にビス止めしてある。オリフィス孔は金属製ストッパーで自由に開閉できる。使用したオリフィスの形状は図2に示すとおりで孔の加工はすべてジグボーリングマシンで行ない。リーマー仕上げをしてある。三脚に垂直に立てられたガラス容器に充てんされた試料粉粒は容器底部のオリフィスより自由落下し、オリフィス下3cmを通過する粘着テープに固定される。オリフィス下端と粘着テープ面との距離はオリフィス厚の変化に関係なく常に3cmになるよう三脚にて調整できる。粘着テープは透明度こそ劣るが、伸張力、粘着力な

図1 実験装置

① 誘導モーター	⑤ オリフィス
② ガイド用ゴムロール	⑥ 三脚台
③ ストッパー	⑦ テープ
④ ガラス円筒容器	⑧ カセット

図2 オリフィス

* 昭和45年8月3日受理

** 宮城工業高等専門学校 (〒981-12 名取市愛島塩手字野田山48)
TEL 02238-2-2171

どの点にすぐれた塗装用和紙テープを使用し、両側にはロールガイドとなる紙テープを貼布した。測定用テープは図1⑥にあるカセットに巻きあげられており、①の可変モーターでガイド上を案内される、誘導モーターを使用しているため、定速回転に達してからクラッチ機構でガイドロールに連結した。

2.2 試料およびテープ

試料粉は比較的球状粉の得やすい噴霧銅粉を用い、さらに解析を容易にするため角度 $2\sim 3^\circ$ の斜面上をころがし完全球を選別した後、Tyler のフルイで $147\sim 104\mu$, $104\sim 74\mu$, $74\sim 61\mu$, $61\sim 53\mu$, $53\sim 43\mu$ の5段階の球形銅粉として使用した。代表として平均粒径 89.0μ の試料粉粒を図3に示す。

選別したままの粉粒には不純物が混入しているのでアセトンで洗浄した後、十分乾燥させVミキサーにて混合し試料とした。試料粉の真密度は図4に示すピクノメー

図3 球状選別粉 $\times 100$

図4 ピクノメータ法による密度測定装置 K_1, K_2, K_3 : ガラスコック
① 標準液注入漏斗
② 標準液だめ
③ ピクノメータ

表1 真密度および見掛け密度

粉末の種類 粉末粒度	噴霧銅粉	
	真密度 (g/cm^3)	見掛け密度 (g/cm^3)
125.5μ	7.994	5.12
89.0μ	7.993	4.87
67.5μ	7.884	5.06
56.5μ	7.953	5.05
48.0μ	7.992	5.03
平均	7.983	5.03

タにより測定した。測定に際し粒子間に残留するガスの除去を円滑にするため、標準液中に表面活性剤として高級アルコールを添加した。見掛け密度については JIS-Z-2500, 2504 に規定されてある方法により測定した結果を表1に示す。一方排出粉粒子を固着させる粘着テープの糊は湿度によって若干粘着力が左右されるので常に室温 18°C 、湿度 $50\sim 60\%$ にて実験直前まで保存し使用に際しては湿度 $65\sim 85\%$ にて測定した。

良好な条件のもとではテープと粒子との固着性は相当強いが排出粒子密度の関係からオリフィス径の増大に伴って粒子の100%捕集はむづかしい。オリフィス径 $3\text{mm}\phi$ までは回収率は比較的良いが $4\text{mm}\phi$ 以上となると排出量は急増するため回収率は低下する。しかし脈流は鮮明に表われているので脈流周期の観察には適当であると思われるが、排出個数や排出形態などについての観察はむづかしい。テープの後処理はテープの両側に厚紙をはり付けてあるためテープがからみ合ったり、粉がはく離するようなことはなく、しかも時間の経過とともに糊は湿度によって軟化し粒子面をおおうようになり、さらに放置すると糊は硬化し、粒子は定着するのでまったくはく離しない。

2.3 実験方法

図1④にある円筒ガラス容器に銅粉をホッパーにて静かに層高 20cm に充てんし容器下部に取り付けられた各オリフィスより自由落下させ、オリフィス下 3cm を $11.78\text{m}/\text{sec}$ で高速移動する粘着テープ上に固着させ、その個数を万能投影機にて拡大し計数した。測定に当たって、モーターの回転数や銅粉の排出量の安定な時点での実験が必要となり、銅粉はストッパー開放から数秒間は流動不安定なため排出初期は除外した。回転数はストロボスコープにて毎回チェックし、それとゴムロールにピンを打ち込み、回転と同時にテープにマークされるピン孔の距離からテープ送り速度を測定した。

3. 測定結果および考察

脈流測定実験を常に安定状態のもとで実験を行なうため、はじめに装置の幾何学的形状(粉体の層高、容器径、オリフィス径、オリフィス厚、粒子径)が流動度に及ぼす関係について測定⁹⁾した。測定結果を以下に整理する。

(1) 容器径

円筒ガラス容器内径が 31.1mm , 27.5mm , 22.9mm , 17.6mm , 12.1mm の5種類について測定した結果、図5に示すとおり流動度に対する容器径の影響はほとんどない。

● オリフィス径 3mmφ ○ オリフィス径 2mmφ
× オリフィス径 1mmφ 粒子径 125.5μ

図 5 容器径による影響

● オリフィス径 2.5mmφ ○ オリフィス径 2.0mmφ
× オリフィス径 1.5mmφ 平均粒度 12.5μ
容器内径 31.1mmφ

図 6 粉体層高による影響

(2) 粉体層高

結果を図 6 に示す。流出終了直前に流動度は大きく変化するが本装置では層高約 10mm 以上であれば影響はまったく受けない。

(3) オリフィス径

オリフィス径を 1.0mm~4.0mm まで 0.5mm ごとに測定した結果、流動度を Q とすると $Q=11.56D^{2.87}$ の関係がある。 D はオリフィス径である。結果を図 7 に示す (オリフィス厚は 2mm を使用した)。

(4) 粒子径

使用した銅粉は図 3 に見るとおり、大体球状をなしているため、比較的明確なグラフが画けた。銅粉の場合、

● 平均粒子径 125.5μ ○ 平均粒子径 67.5μ
× 平均粒子径 48.0μ 容器内径 31.1mmφ

図 7 オリフィス径による影響

容器径 31.1mmφ オリフィス径 2.0mmφ

図 8 粒子径による影響

容器径 31.1mmφ オリフィス径 2.0mmφ
平均粒子径 125.5μ

図 9 オリフィス厚さの流動度に及ぼす影響

図 10 脈動記録テープ

表 2 脈動流に及ぼすオリフィス厚さの影響

オリフィス径	2 mmφ		3 mmφ	
オリフィス厚	流動部長さ	単位センチ 当り粒子個 数	流動部長さ	単位センチ 当り粒子個 数
1mm			22.0mm	111.4
2mm	19.7mm	31.3	34.0mm	128.6
3mm	24.5mm	30.7	36.4mm	138.9
5mm	25.3mm	30.3	29.2mm	50.3
7mm			25.8mm	
10mm	23.6mm	33.7		
15mm		16.6	31.8mm	119.0
20mm		25.2		
25mm	36.8mm	30.3		
30mm	42.0mm	30.2	18.3mm	
40mm	35.1mm	40.0	23.2mm	79.7

容器径 31.1mmφ オリフィス径 2.0mmφ
平均粒子径 125.5μ

図 11 オリフィス厚さの排出粒子個数に及ぼす影響

56.5μ を最高とし粒度が増加するに従い流動度は直線的に減少する。しかし 56.5μ 以下の粒子では再び流動度は低下するが、これは粒子間に働く諸種の凝集力の影響によると考えられる。測定結果は図 8 に示すとおりである。

(5) オリフィス厚

図 2 に見られるようなオリフィスにて実験を行なった。結果は図 9 に示すとおりオリフィス厚がごく薄い間は一一定の流動度を示すが厚さが増加するに従い徐々に低下し、15mm 付近で最低となり再び流動度は増加し 25mm より一定値におちつくことがわかった。

表 3 脈動流に及ぼすオリフィス径の影響

オリフィス径	流動部長さ	〃	〃	単位センチ 当り粒子個数
1mmφ				5
1.5mm	22.0mm	21.0mm		9
2mm	24.5mm	19.5mm		31
3mm	36.4mm	12.2mm		154
4mm	41.5mm	7.5mm		187
5mm	51.2mm	4.0mm		495

以上の結果から容器径 31.1mm, 粒子径 74μ~104μ, 粉体層高 20cm を一定として脈動測定実験を行なった。図 10 に示すように粘着テープ上には脈流現象が明確に示され、同時に個数分布も測定できる。計数に当りオリフィス径 2mmφ についてはかなり明りょうに計数できるが 3mmφ 以上ともなると排出銅粉が重なり合い飛散するため判断しにくくなる。直径 2mmφ, および 3mmφ における各オリフィス厚についてのデータを表 2 に示す。表 2 のうち 2mmφ についてグラフを画くと 図 11 のようになる。これはオリフィス厚さ-流動度の関係曲線(実線)とまったく一致することがわかる。

表 2 に示した粒子個数は 1 周期の排出個数を脈動流の長さで除し単位センチメートル当りの個数を示している。図 9 に示した流動度関係グラフと図 11 に示した排出個数の関係グラフから両者を一概に簡単に関係づけるわけにはいかない。それは個数減少とともに脈動流の間隔が不連続となりしかも 25mm 厚以上では流出時間が長くなっているためである。この点について排出個数が途中で減少することは粒子の壁面衝突によって生ずる微小振動がオリフィス孔上部と下部に形成される架橋と何らかの相互作用を及ぼし合うと考えられるが今後振動試験などを行ない原因を追求しさらに検討を加えたい。

粘着テープに記録された銅粉部の長さ空白部の長さとの関係、すなわち架橋生成、および崩壊時間との関係をオリフィス厚さ 3mm に一定とし各オリフィス径について測定した結果を表 3 に示す。直径 1mmφ~5mmφ までについて見るとオリフィス径の増加に従い排出個数も増加し特に 3mmφ 以上では急激に増加している。なお 4mmφ 以上では粒の重なり合いによって銅粉がかなり飛散しているので実質排出個数はより増加している。またオリフィス径が大きくなるに従い銅粉流動部が長く、空白部は短くなる傾向にある。特に 5mmφ では空白部はごく一部にしか認められず連続流に近い状態を示している。小径では空白部が長く 1.5mmφ, 2mmφ 付近では流動部分と空白部分の比がほぼ等しくなる傾向にある。1mmφ では粒径に対し相対オリフィス径が小さ

図 12 流動模型図

く排出粒子は広く散乱するため脈流は明確に判断しにくい。架橋は容器内粉体圧の重力方向と水平方向の力学関係および凝集力の均衡が保たれる結果として生じ、再び容器内粉体の移動の際の回転および振動によって破壊され崩壊するものと考えられている。このことからオリフィス径を変えた場合の脈流現象についてよく知られている流動模型図、図 12 を使って考察すると、②の加速領域と⑤の静止領域との間には③の境界領域がある。この③の領域は静止層⑤の面上を数層になって②に比べごく低速で落下する。この際粒子間摩擦によって回転力を与えられつつ落下するため、落下速度は限定される。一方②の領域は①の自由落下した部分を充足するため垂直方向に落下する領域であって鉛直方向に比較的高速移動をするが、領域③を滑り落ちてくる低速粒子と衝突し運動エネルギーの一部を失い低速となる。その結果 ABC 面付近、特に AB 付近の密度が高くなり閉塞を作りやすくなる。しかし粒子は摩擦によって常に回転しているのでその回転力によって再び閉塞は破壊される。したがってオリフィス径が大きくなれば①の領域の増加とともに②の垂直方向の高速落下領域も増加する。しかし半割りした円筒容器の断面より流動模様を64コマにセットした8mmカメラで、粒径1mmφ、2mmφ、4mmφの銅球について観察した結果によれば(未発表)、②と⑤との境界層③の幅はそれほどの変化はない。したがって②領域への③領域の影響はオリフィス径の増大とともに相対的に小さくなるため、②領域の落下速度は径の増大とともに増大し、かつ回転力を持っているので閉塞部を作るのに時間がかかり、また形成されても粒の持つエネルギーが大きく、回転力を伴っているため、すぐに破壊され

図 13 流出粉体の空隙率の変化

ると考えられる。したがって表 2 にみるように、径の増加とともに流動部の長さが長く、空白部が短くなっている。従来粉体の脈動流に及ぼす空隙率の変化は Brown⁸⁾ らによって高速度カメラ(500コマ)で観察され図 13 の関係グラフが得られている。このグラフは粒径が相当大きい銅球について実験したものであるが、それによると定常流で流出したと仮定した場合の空隙率を境に上下に大きく変動し、しかも比較の変動周期は大きい。また小さい排出口では 1/100 秒くらいの排出停止状態がみられたということであるが、本実験によって得られた傾向について定性的ではあるが測定結果を示すとそれよりさらに小さく 1/500~1/600 秒の周期で脈流が起こっていることが分った。

4. 結 言

以上の結果を総括すると

(1) 水平円孔オリフィスから銅粉が排出する際に生ずる動的架橋は 1/500~1/600 秒の周期で運動を繰り返している。

(2) オリフィス厚 3mmφ、容器管内径 31.1mmφ、粒子径 74~104μmφ においてオリフィス径が増加するに従い脈動流の銅粉付着部が長く、空白部すなわち、架橋作成時間は短くなる傾向にある。またオリフィス径 2mmφ においてオリフィス厚を変化させると 15mm、20mm 厚では不定脈流となるが 1mm~10mmφの間では流出時間が一定で平均 23.3cm、25mm~40mm では前者より長くほぼ一定で平均 38.0cm となっている。

(3) オリフィス径 2mmφ、管内径 31.1mmφ、粒子径 74~104μm の球状銅粉を使用しオリフィス厚による排出粒子個数の変化を求めた結果、オリフィス厚 15mm、20mm において極端に排出個数が減少しており、その関係は丁度、オリフィス厚さ-流動度関係曲線と一致する。

脈動流に関する研究はまだ興味深い問題も多いが、本報告はまだ研究の途上ではあるが測定装置の概要と二三の傾向を示すにとどめる。今後は脈流時に生ずる振動の測定および動摩擦の測定を観察したい。

引用文献

- 1) Franklin, F. C. & Johanson, L. N. : *Chem. Eng. Sci.*, 4, 1955
- 2) Deming, W. E. & Mehring, A. L. : *Ind. Eng. Chem.*, 21, [7] (1929)
- 3) 白井隆 : 化学機械, 16, [3] (1952)
- 4) Raush, J. M. : ph. D. thesis Princeton Univ. (1948)
- 5) 種谷真一, 内山超 : 材料, 3, [15] (1966)
- 6) Harmans, A. : *Chem. Eng. Sci.*, 18, 297 (1963)
- 7) 横山藤平 : “粉体工学研究会技術資料”
- 8) Brown, R. L. & Richards, T. C. : *ibid*, 38, 243 (1960)
- 9) 菊田, 丹野 : 宮城工業高等専門学校研究紀要 No. 4 (1967)

Abstract

On the Pulsating Flow of Cu-powder through an Orifice

Koichi Tanno, Sadao Kikuta, Fujio Takahashi, Saburo Nakamura

The authors make an experiment of the pulsating flow of Cu-powder through an orifice.

In this experiment, we adopt the method of letting Cu-powder fall on the stick tape that run under the orifice at a high speed and obtain the following three results.

(1) The phenomenon of binetic bridging appear on the stick tape by the frequency of 1/500~1/600 per second.

(2) The quantity of discharged Cu-powder decreases only in the case of using the orifices with thickness of 15mm and 20mm.

(3) The period in which each bridging is sustained is apt to become short with the increase of the orifice diameter.

(Mechanical Engineering, Miyagi Technical College)

〔書 評〕

Food Engineering Operations

J. G. Brennan J. R. Butters } 共著
N. D. Cowell A. E. V. Lilly }

Elsevier Pub. Co. Ltd., 1969年, 5,700円

食品工学を単位操作別に構成した本であって, 化学工学的にみて大変興味深い。その中で Size Reduction and Screening of Solids, Mixing and Emulsification, Filtration and Expression, Centrifugation, Crystallization, Materials Handling と粉体・粒体に関連した分野が多い。入門教科書風のものであるから, 化学工学,

粉体工学という立場からみると個々の内容は物足りないが, 食品化学工学というべき新しい観点からみると非常に興味深い試みといえる。とりあげられている粉体機械関係もやはり特殊性をもったものが目につき, 新しい分野への発展を考えている人にとっては参考になる点も多いであろう。
(G. J.)