シャフトキルン内における粒子降下速度 分布について (I)

高 津 學

(名古屋工業大学)

Study on Radial Velocity Distributions of Particle Flow in Shaft Kiln, I

By

Manabu TAKATSU

(Nagoya Institute of Technology)

It's well known that heat transfer to the reacting surface is the rate controlling step for some reactions such as the calcination of lime or dolomite in shaft kiln.

Therefore to know the behaviours of particles flow in shaft kiln is of the most importance. In this paper, determination was made on the velocity distributions of particle flow in shaft kiln, using the apparatus showed in Fig. I. Tracer particles were added on the top of the apparatus and velocity distributions in vertical semi-cylinder were observed and measured. The next equation was obtained for the radial velocity distribution.

$$(u_0 - u)/(u_0 - u_w) = (r/D_T)^{2+m}$$

In the boundary layer having velocity gradient the bulk density of particle layer shows great difference, and there are some important relations between velocity distribution and bulk density. The value m above mentioned well accounts for this reason.

[Received Nov. 4, 1964]

I. 緒 言

シャフトキルンは石灰石、ドロマイトの煅焼、あるいはセメントの焼成などに広く用いられている。このキルン内を移動(降下)するそれらの粒子はほぼ押し出し流れと見る事が出来るが、石灰石の煅焼の場合のように、その煅焼反応速度が伝熱速度支配となるものは、キルン内の粒子の移動速度の相違、空隙率の分布状態、壁からの熱損失の大小などによって半径方向に非常に大きな温度差を生じ、煅焼帯において原料が同じ熱履歴をたどる事が困難となる。

この熱履歴の差異は成品の品質に非常に大きな影響をおよぼし、石灰石などの煅焼の場合には分解反応が終了後、CaOの結晶の成長によってその活性が著しく異なる結果となる。

この問題について従来は主に経験的事実にもとずいて装置に種々考案がなされているが、基礎的な実験は数少ない。そこで、この報告ではまず層内の粒子の降下速度分布について実験検討を行なった。

シャフトキルンの形状はその用途あるいは発展経過などによっていろいろ異なっているが、最も単純な形を考えれば、その主要部分は垂直円筒、円錐台、逆円錐台の三種のうちのいずれか、またはそれらの組合せと考えられる。

そこで、まず出来るだけ単純な形の装置内を降下する粒子の移動速度分布についての一般的通則を発見することが必要である。

これらの問題を実際の装置のスケールで行なう実験はいろいろな困難をとまなうため、実際の装置との間の相似性を考慮し、モデル実験により考察を進めることが望ましい。モデル実験によって、キルン内を降下する粒子の降下速度分布を実測している報告は数少ないが、それらを大別すると

(1) キルン内の粒子の挙動を半円筒を用いて考察している研究³⁾、

(2) 拡散混合の理論を応用しキルンの混合特性を求めてそれより考察している研究¹⁾

があり、前者はキルンの形状、あるいは粒子管径比などにより粒子の流れ模様が如何に変わるかについて考察し、後者はキルンの混合特性より壁近傍の粒子層について検討している。

II. 半実験式の誘導

一般に垂直円筒形の装置内を降下する粒子の降下速度は、壁の摩擦抵抗によりその中心部の粒子の降下速度が大きく、側壁部近傍では著しくその移動速度は小さい。また、粒子の形状係数が小さく不規則な形をしてい

る場合は、粒子間の摩擦抵抗も大きく、したがって摩擦抵抗の最も小さく、かつ粒子降下の際生ずる剪断力の大きい面に最も大きな速度勾配を生ずることになる。

一方、粒子が降下する場合、粒子の半径方向に対する混合はおきないと考えられるので、粒子の降下速度に対し半径方向に速度勾配を生ずるためには、その部分は他の部分よりかなり大きな空隙率を有する事が必要である。すなわち、装置内に充填された粒子はたがいに重なり合って充填されているので、この粒子間に速度差が生ずるためには粒子は非常に大がかりな再配列を必要とする。したがって、粒子の移動速度勾配の大きい側壁近傍では空隙率がかなり大きい事が必要である。これらの点を考慮してキルン内の粒子の降下速度についてモデルを考えると、

$$\pi r^2 p + 2\pi r \cdot g(r) = -\mu f(r) \cdot 2\pi r \cdot du/dr \quad \dots (1)$$

が得られる。ただし、 r は中心より半径方向の距離、 p は垂直方向に単位断面に加わる力、 u は半径方向 r なる位置の粒子降下速度、 μ は粒間摩擦係数である。また、 $f(r)$ は粒子間の接触面積に対する補正係数で、空隙率の小さな変化に対しても大きな影響が現われる。さらに空隙率がある値以下になれば粒子間の摩擦力は非常に大きくなり粒子間に速度勾配が生じなくなる。したがって $f(r)$ は

$$f(r) = [4\varepsilon]^{-c}$$

$$4\varepsilon = \varepsilon - \varepsilon_0 = a^* r^{m^*}$$

$$\therefore f(r) = ar^{-m} \quad \dots (2)$$

と仮定することが出来る^{4), 5)}。ただし ε は空隙率（添字 0 を附したのは充填層の場合の空隙率）で、 $a, m; a^*, m^*$ は定数である。

また、他方円錐台、逆円錐台などの場合を考え、壁の支持力、即ち垂直方向に働く力をも考慮に入れるため、 $g(r)$ なる函数を考え、これを

$$g(r) = br^n \quad \dots (3)$$

但し b, n は定数

逆円錐台 $b > 0$ 、円錐台 $b < 0$ 、円筒 $b = 0$ と仮定すると上式は

$$[1/a\mu] \cdot r^m [(p/2)r + br^n] = -du/dr \quad \dots (4)$$

となるしたがって $r=0, \rightarrow u=u_0$ より

$$\begin{cases} u_0 - u = \alpha r^{2+m} [\beta + \gamma r^{n-1}] \\ \alpha = 1/a\mu, \beta = p/2(m+2), \gamma = b/(1+m+n) \end{cases} \quad \dots (5)$$

となる。垂直円筒の場合は $g(r) = 0$ となるから右辺第二項は 0 となり

$$u_0 - u = \alpha\beta r^{2+m} \quad \dots (6)$$

となり、 $r=D_T$ の時 $u=u_w$ であるから

$$\frac{u_0 - u}{u_0 - u_w} = \left(\frac{r}{D_T}\right)^{2+m} \quad \dots (7)$$

となる。ただし D_T は円筒半径である。

またキルン内を降下する粒子の流れが栓流になる場合

はその速度勾配の生ずる範囲においては近似的に

$$f(r) = a$$

となると考えると上式と全く同様に

$$-\frac{P}{2a\mu}(r-r_0) = du/dr \quad \dots (8)$$

$$\therefore \frac{u_0 - u}{u_0 - u_w} = \left(\frac{r-r_0}{D_T-r_0}\right)^2 \quad \dots (9)$$

となる。ただし r_0 は栓流部分の半径である。

III. 実験方法

実験装置は図-1 に示した如く半円筒を用い、軸を含む切断面はアクリル樹脂板を使用し粒子と板の摩擦を小さくするよう心がけ、その断面において粒子の降下速度を実測した。半円筒の下部には電磁フィーダーを取りつけ、上部は層高が一定となるようにさらに一つホッパーを取りつけた。また半円筒は長さ 50 cm、直径 12 cm とし側壁はサンド紙 (AA-120) をはりつけた。

Fig. 1. Experimental apparatus.

使用した粒子はセメントをペレタイザーで造粒した粒子 $D_P = 2.0 \text{ mm}, 3.4 \text{ mm}, 4.1 \text{ mm}, 6.0 \text{ mm}$ 、の四種および石灰石破砕片 $D_P = 4.1 \text{ mm}, 5.8 \text{ mm}, 8.1 \text{ mm}$ の三種を選び、粒子の平均排出速度は $0.517 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{sec}$ とした。

なお、粒子の降下速度に対し円筒下部の粒子取出口の形状、および取出方法の影響をうけやすいため、層下部より 30 cm の位置で測定を行なった。

また、キルン内の空隙率に及ぼす壁効果をしらべるために種々の径の垂直円筒内の粒子層の平均空隙率を実測した。

IV. 実験結果および考察

円筒内を降下する粒子の流れ模様の一例を 図-2 に示す。これらの円筒内では半径方向の粒子混合は見られず、側壁近傍ではその摩擦抵抗の大きい場合はかなり空隙率が異なる事が見とめられた。また、粒子層内または側壁部のうちその摩擦抵抗の最も小さい所に最も大きな速度勾配が生ずる事

Fig. 2. Radial velocity distribution of particle flow.

が推察出来る。

円筒内ではその空隙率は側壁近傍において最も大きいから、模式的に考えると壁に接している一粒子層がまず壁との摩擦によって遅れ、その壁に接する一粒子層のため、その内部に接する一粒子層も遅れを生ずる。同じようにして層内部に伝播し、そのため半径方向に移動速度分布が生ずると考えられる。この場合、壁に接する一粒子層と壁との間の摩擦にはころがり摩擦とすべり摩擦が考えられるが、ころがりながら降下しようとする粒子は当然回転する方向は 図-3 に示したように左廻りに回転し、その内側の粒子は右廻りに回転しなければならない。このように粒子が回転する事は非常に困難でそのまま降下の方が容易である。そしてそれらの粒子間の力の均衡が保たれると局部的に粒子の降下が阻止され、その

Fig. 3. Schematic diagram of the particle flow near the side wall.

の粒子の下部に大きな空隙が生じ、しばしばわずかではあるが軸方向に対して粒子混合が起こる。このようにして生ずる局部的な力の均衡は、粒子管径比が大きい場合には架橋現象をひき起こす。この実験の場合には粒子

Fig. 4. Plots of $(u_0 - u)/(u_0 - u_w)$ versus (r/D_T) .

Fig. 5. Plots of $(u_0 - u)/(u_0 - u_w)$ versus (r/D_T) .

Fig. 6. Plots of m in the equation (7) versus particle diameter.

れ、バラツキの多い結果が得られた。

垂直半円筒によって粒子降下速度分布を求めた結果を (7) 式にしたがってまとめた結果を 図-4,5 に示す。これらの実験結果はきわめて良好な直線となり、(7) 式中の空隙率による補正項 (2) 式はより正確な表現が可能であるが、実際上中心部の速度勾配が非常に小さいため、この仮定は充分有効であると考えられる。

また、それらの勾配から得られた m の値と粒子径の関係について 図-6 に示した。この m 値は粒子径およびその形状係数の大きさによって種々異なると考えられる。

さて、以上説明した如くキルン内を降下する粒子の速

管径比がおおよそ 1/10 以上の時しばしば架橋現象を起こした。また粒子径が大きい場合ほど壁の影響を受けやすく逆に係数係数の小さいものほど速度分布が小さい。その結果壁近傍における粒子の移動速度の定常性は失われ、

Fig. 7. Schematic diagram of the porosity of particle layer in the kiln.

度分布はその空隙率の分布状態におうところが非常に大きい。したがって壁の状態と空隙率の分布状態の関係を出来るだけ適確に簡単な型として知る必要がある。そこで 図-7 に示すように中心部の空隙率一定の部分と、壁摩擦によって空隙の分布の異なる部分に分け、層内の空隙分布に及ぼす壁摩擦の影響について検討する。

このモデルによれば平均空隙率 $\bar{\varepsilon}$ は

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon_0 + \frac{1}{\pi D_T^2} \int_0^{\varepsilon_w - \varepsilon_0} \pi [D_T^2 - (D_T - y)^2] d\varepsilon \quad (10)$$

$$\frac{\bar{\varepsilon} - \varepsilon_0}{\varepsilon_w - \varepsilon_0} = \left(\frac{\xi}{D_T} \right) - \frac{1}{3} \left(\frac{\xi}{D_T} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで (ξ/D_T) が小さい時には 右辺第二項が省略出来る。また、 ξ は粒径 D_P 、および壁摩擦の大きさによって異なる定数 k に比例すると考えると

$$\frac{\bar{\varepsilon} - \varepsilon_0}{\varepsilon_w - \varepsilon_0} \approx k' \left(\frac{D_P}{D_T} \right) \quad \dots\dots\dots (12)$$

となる。

図-8~10 に粒径、 (D_P/D_T) 比、壁摩擦を種々変えた場合の平均空隙率 $\bar{\varepsilon}$ の実測値を示す。この図に示されているように (D_P/D_T) 比と平均空隙率の間にはほぼ直線的な関係があり、壁摩擦が小さい場合には粒径 D_P が異なってもその勾配はほぼ一定の値を示す。また (11) 式にしたがって考えると壁摩擦の影響をうける部分は壁摩擦が大きい場合には大きく変化する事になる。

以上の結果を総括すると次のようになる。キルン内ではまず壁の摩擦係数に対応して空隙率分布が定まり、かつ壁と中心部の降下速度の差が定まる。また、空隙率分布状態により半径方向の粒子降下速度分布が定まる事になる。これらの関係は前記の半実験式を非常によく説明する結果である。

V. 結 言

著者は垂直円筒中を降下する粒子の速度分布について簡単なモデルを設定し、半実験式を導びき、降下する粒子の挙動につき実験検討した。また、層内の壁近傍にお

いてその空隙率が著しく異なる事を確認し、それらに及ぼす因子について検討した。

Particle diameter 4.0 mm; roughness of the side wall, No. 1 sand paper (rough), No. 2 sand paper (fine), No. 3 no sand paper.

Fig. 8 Plots of porosity $\varepsilon_{av.}$ versus (D_P/D_T) .

Fig. 9. Plots of porosity $\varepsilon_{av.}$ versus (D_P/D_T) .

Fig. 10. Plots of porosity $\varepsilon_{av.}$ versus (D_P/D_T) .

文 献

- 1) 矢木, 国井ほか, 化学工学, **25** (6) 469 (1961).
- 2) 外山, 化学工学, **27** (6) 396 (1963).
- 3) 野田, 上田, 石膏石灰, **23**, 27 (1956).
- 4) Roblee A.I.Ch.E.J., **4**, 460 (1958).
- 5) Sonntag, Chem. Ing. Tech., **32**, 317 (1960).

(11/4/64 受付)