連続式回転円錐型容器による
造粒と粉砕と分粒との同時操作
— 造粒粒子形状特性に及ぼす操作条件の影響 —

杉本益規*, 杉原昌樹*, 横田尚子*, 林田健志*

The Simultaneous Operation of Granulation, Grinding and
Separation by a Continuous Rotating Conical Vessel
— The Effect of Operating Conditions on the Granule Shape —

by

Masunori SUGIMOTO[†], Masaki SUGIHARA[†]
Naoko YOKOTA[†] and Takeshi HAYASHIDA[†]

To develop a continuous granulation process for the transformation of fine powder into the smaller and more spherical granules, the operations of granulation, grinding and separation are performed simultaneously in a continuous rotating conical vessel.

The experiments are carried out by using CaCO_3 -powder and water. The effect of the operating conditions on the shape of granules is investigated on the basis of a continuous granulation process model of the simultaneous operation. It can be considered, in the present model, that the shape characteristics of the final product are given by two kinds of granules differing in shape. One is more spherical granules which are made to round with the number of total cascading flow passing through the conical vessel, and the other is non-spherical ground granules the amounts of which increase with the feed ratio of the binder to the powder.

As a result, it is possible to continuously make a fine powder into smaller and more spherical granules by the above simultaneous operation under appropriate conditions of a smaller feed ratio and the larger number of the cascading flow through the conical vessel.

Key Words : Continuous Granulation Process, Granule Shape, Granulation and Grinding, Rotating Conical Vessel, Simultaneous Operation

1. 緒言

最近、超微粒子を含む微粉末の新しい生成法も開発され、これら微粉末は粉体素材として広く採用されつ

つある。これにともない、これら微粉末の粉体工学的処理に関する種々の問題が指摘され¹⁾、この解決法の一つにこれらを取り扱い容易な流動性の高い微細球状造粒粒子に成形する方法が考えられる。したがって、造粒粒子に対する期待は大きく、造粒粒子の大きさのみならず、形状特性に対する仕様も注目されつつある。

筆者らは、粉体プロセスの複合化^{2,3)}による省エネルギー的造粒プロセスの一つとして、前報において、単一回転円錐型容器による造粒と粉砕と分粒との同時操作について検討し⁴⁾、同時操作における造粒粒子径に

平成2年8月31日受付

第26回夏期シンポジウム(1990年7月, 神戸)にて発表

* 富山大学工学部物質工学科(〒930 富山市五福3190)

TEL 0764-41-1271 内線 2782

[†] Dept. of Materials Science and Engineering, Toyama University, 3190 Gofuku, Toyama, 930

および操作条件の影響について報告した⁵⁾。

本報では、連続式単一回転円錐型容器を用いた造粒と粉碎と分粒との同時操作を試み、これにより得られる造粒粒子の形状特性におよぼす操作条件の影響について検討したので、ここに報告する。

2. 実験装置および方法

実験装置：前報⁵⁾と同じ装置を使用した。以下、その概略を示す。装置本体である円錐型容器を回転円筒内に固定し、同容器の大口径端を封じ、小口径端にはオリフィス型出口せきを設けた。粉末原料の連続定量供給には、テーブルフィーダーおよび輸送用電磁フィーダーを、バインダーの連続定量供給には、定量ポンプおよびノズルを用いた。粉碎媒体には、直径30 mmと16 mmの磁製ボール(密度 $=2.4 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)を重量比1:1の割合で混合装填した。

実験試料：粉末原料には市販の炭酸カルシウム粉末(50%粒子径 $\approx 6 \mu\text{m}$)を、バインダーには水を使用した。なお、容器回転軸を小口径端側に 2° 傾けた。

実験方法：粉碎媒体である磁製ボールを所定量装填したのち、容器を所定の回転速度に固定し、原料(炭酸カルシウム粉末)を容器中央部に連続供給した。バインダー(水)を原料供給位置に滴状供給した。容器小口径端からの造粒粒子群の排出特性が定常状態に達したのち、一定時間この排出粒子(造粒製品)を採取し、乾燥後、小型分析ふるいにより粒度分析を行った。ふるい分けされた各粒径範囲にある造粒粒子群からそれぞれ無作為に50個の粒子を抽出し、画像処理解析装置

Table 1 Experimental Conditions

Feed rate of powder	$F(\text{kg} \cdot \text{min}^{-1})$	$(5 \sim 31) \times 10^{-3}$
Feed rate of binder	$G(\text{kg} \cdot \text{min}^{-1})$	$(5 \sim 31) \times 10^{-4}$
Feed ratio ($= G/F$)	$W(-)$	$0.03 \sim 0.16$
Speed of rotation	$n(\text{min}^{-1})$	$17 \sim 60$
Weight of balls	$B(\text{kg})$	$0.2 \sim 0.8$
Average residence time	$\bar{\theta}(\text{min})$	$19 \sim 106$

(LUZEX II, ニレコ製)により、造粒粒子の形状分析を行った。なお、実験条件はTable 1に示す(フローシートはFig. 6を参照)。

3. 実験結果

3.1 造粒粒子径と形状特性

本報では、造粒粒子群の形状特性を粒子の投影画像をもとに、次式で定義される円形度 δ により検討した。

$$\delta = D_H/D_P \quad (0 \leq \delta \leq 1.0) \quad (1)$$

ここで、 D_H はHeywood径であり、 D_P は粒子投影画像の最長径である。本報で得られた造粒粒子では、 $\delta = 1.0$ に近い粒子ほど球状に近い造粒粒子であることが確かめられた⁴⁾。

Fig. 1は、ふるい分けされた各粒径範囲にある造粒粒子群から、無作為に抽出した50個の粒子群の形状指数 δ を測定した結果の代表例である。同図には、 δ の大きい順に1～5位と46～50位にある造粒粒子群の投影画像のみを示した。なお、同図の δ_x は粒子径 x を平均径とする微小粒径範囲にある50個の造粒粒子群の平均形状指数である。以下、これを $x = x$ の造粒粒子の形状指数と呼ぶ。同図からもわかるように、粒径範囲

Fig. 1 Typical projected pictures of different size granules in a final product obtained at $n=50 \text{ min}^{-1}$, $B=0.4 \text{ kg}$, $W=0.1$, $\bar{\theta}=40 \text{ min}$. The pictures of 50 granules were arranged in order of the maximum shape index δ of the granules for each size (the 6th-45th pictures were omitted in this figure)

Fig. 2 Relationships between size x and shape index δ_s of granules obtained under various feed ratio of binder to powder W (a), and speed of rotation n (b)

が106~150 μm にある微細造粒粒子群の輪郭に多少の凹凸は目立つが、円形に近い画像を有する粒子が含まれ、微細球状造粒粒子の生成の可能性を示している。また、 x の増大にともない、輪郭が平滑で、より円形に近い画像の粒子群が多く含まれ、表面の平滑な球状造粒粒子が多く生成されている。

Fig. 2は、Fig. 1の結果をもとに造粒粒子径 x とその形状指数 δ_s との関係を示したものである。同図(a)ではバインダー・原料供給比 W をパラメータに、同図(b)では、容器回転速度 n をパラメータに示した。 $W=0.158$ の実験結果を除き、(a), (b), いずれも $x \geq 500 \mu\text{m}$ では δ_s は x に無関係にほぼ一定値を示し、 δ_s の値は n , W によって変化しているが、いずれも $\delta_s \geq 0.9$ を示している。Fig. 1の各粒子画像と対比することにより、少なくとも $x > 500 \mu\text{m}$ の造粒粒子は球状に近い造粒粒子であると言えよう。一方、 $x < 500 \mu\text{m}$ では、いずれの場合も x の減少にともない δ_s も減少している。これらの結果は、 n , W には無関係にほぼ類似した傾向を示している。これは、いずれも粗大造粒粒子が粉碎により微細化され、非球状化が促された結果によるものと推定される。なお、 $W=0.158$ の場合、 x の全域にて δ_s は小さくなっている。これは、 W が大きいことから粗大造粒粒子が多量に生成され、粉碎された結果、

造粒製品中の大部分が破碎造粒粒子で占められたことによるものと思われる。

3.2 粒子形状に及ぼす操作条件の影響

3.2.1 バインダー・原料供給比(W)の影響

Figs. 3 および 4 は、得られた造粒製品の平均形状指数 $\bar{\delta}_p$ とバインダー・原料供給比 W との実験結果を示したものである。Fig. 3では、容器回転速度 $n(\text{min}^{-1})$ を、Fig. 4では、ボール装填量 $B(\text{kg})$ をパラメータに示した。なお、製品の平均円形度 $\bar{\delta}_p$ は得られた製品造粒粒子の粒度分布と粒径 $x = x_i$ の粒子形状指数 $\delta_{s_i}(-)$ をもとに次式より算出された。

$$\bar{\delta}_p = \sum F(x_i) \delta_{s_i} \quad (2)$$

ここで、 $F(x_i)$ は得られた全製品中に含まれる $x = x_i$ の造粒粒子群の質量分率 $(-)$ である。

同図の結果より、操作条件 n , B によって多少異なるが、いずれも W の増大にともない $\bar{\delta}_p$ は減少し、製品の非球状化が促されている。

3.2.2 粒子の容器内総流下回数($n\bar{\theta}$)の影響

転動造粒機内の造粒粒子の整粒効果は、容器の回転にともなう造粒粒子の流下運動の総回数と密接な関係をもつものと考えられる。本報では、容器内で造粒粒子が排出までに受ける総流下回数の代表値として、容器回転速度 n と粒子平均滞留時間 $\bar{\theta}$ の積 $(n\bar{\theta})^*$ を採用した。Fig. 5は、 $\bar{\delta}_p$ と $(n\bar{\theta})$ の実験結果を W をパラメータに示したものである。 $B=0.8 \text{ kg}$ の一部を除いて、いずれもボール装填量に無関係に $\bar{\delta}_p$ と $(n\bar{\theta})$ はよい相関関係を示していることが認められる。すなわち、 W が

Fig. 3 Effect of the feed ratio of binder to powder W on the average shape index $\bar{\delta}_p$ of the final product for various speeds of rotation n

* n が一定の場合でも、造粒粒子径が異なれば滞留時間 θ も異なり、その整粒効果 $(n\bar{\theta})$ も異なると考えられる。いま、Fig. 6のモデルをもとに、 $\bar{x}_G$, $\bar{x}_S$ なる粒子の各平均滞留時間を $\bar{\theta}_G$, $\bar{\theta}_S$ とし、その整粒効果を $n\bar{\theta}_G$, $n\bar{\theta}_S$ とおけば、全粒子に対する $(n\bar{\theta})$ は、

$$n\bar{\theta} = n\bar{\theta}_G F_G + n\bar{\theta}_S (1 - F_G)$$

となる。なお、本報では、 $\bar{\theta}_G$, $\bar{\theta}_S$ の測定が困難であることから、測定可能な全粒子に対する総括的な値として $(n\bar{\theta})$ を採用し、 $\bar{\delta}_p$ との関係により整理した。なお、 $\bar{\delta}_p$ はEq.(4)で与えられる。

Fig. 4 Effect of the feed ratio of binder to powder W on the average shape index $\bar{\delta}_p$ of the final product for various weight of balls charged B as grinding media

一定ならば($n\bar{\theta}$)の増大にともない $\bar{\delta}_p$ は増大し、造粒粒子の球状化が促され、その球状化の度合いは W が小さいほど大きい。なお、同図では、 $W=0.1$ の場合の $B=0.8$ kgの実験値が、 $B=0.2\sim0.6$ kgのそれらとはかなりはずれている。これは、容器全体に対するボールの容積割合の増大にともなう整粒効果の低下と、 W の増大にともなって生成される被粉碎粗大造粒粒子の粉碎効果の増大によるものと思われる。

4. 考 察

ここでは、造粒粒子の形状特性におよぼす操作条件の影響を検討するために、前報⁵⁾と同様にFig. 6のごとく、容器内を3つの仮想的領域に分けて考える。容器中央部(造粒域B)にて造粒された全造粒粒子のうち、粉碎されることなく小口径側(整粒域C)に偏析し、容器排出端にて回収される微細球状粒子の平均径を $\bar{x}_s$ 、その平均形状指数を $\bar{\delta}_s$ 、大口径側(粉碎域A)に偏析した粗大造粒粒子(平均径を $\bar{x}_L$)が粉碎され、微細化されたのち、整粒域Cへて容器排出端にて回収される微細造粒粒子のそれらを $\bar{x}_G$ 、 $\bar{\delta}_G$ ($\leq \bar{\delta}_s$)とする。また、小口径端排出口より回収された全造粒粒子群(最終製品)

$\bar{x}_L$: Average size of larger granules segregating to the grinding zone (A)

$\bar{x}_s, \bar{\delta}_s$: Average size and shape index of granules discharged from the outlet after segregating toward the rounding zone (C) without grinding, respectively

$\bar{x}_G, \bar{\delta}_G$: Average size and shape index of granules discharged from the outlet after $\bar{x}_L$ -granules ground at the grinding zone (A), respectively

$\bar{x}_p, \bar{\delta}_p$: Average size and shape index of the final product, respectively

F_C : Fraction of the granules segregating toward the grinding zone (A)

Fig. 6 A continuous granulation process model of the simultaneous operation of granulation, grinding and separation using a rotating conical vessel

の平均径を $\bar{x}_p$ とし、その平均形状指数を $\bar{\delta}_p$ とする。

いま、 $\bar{x}_L$ なる粗大造粒粒子は粉碎によって、すべて、粒径 $\bar{x}_G$ 、平均形状指数 $\bar{\delta}_G$ なる微細造粒粒子として回収されると仮定すれば、物質収支より、最終製品の平均径 $\bar{x}_p$ および平均形状指数 $\bar{\delta}_p$ は、

$$\bar{x}_p = (1 - F_C) \bar{x}_s + F_C \bar{x}_G \quad (3)$$

$$\bar{\delta}_p = (1 - F_C) \bar{\delta}_s + F_C \bar{\delta}_G \quad (4)$$

ここで、 F_C は、全造粒粒子のうち粉碎域(A)に移動し、 $\bar{x}_G$ 、 $\bar{\delta}_G$ なる微細造粒粒子として回収される被粉碎粗大造粒粒子の割合である。この F_C に関しては、前報⁵⁾と同様に F_C と W との関係をEq.(5)のごとく仮定する。

Fig. 5 Effect of the number of total cascading flow of granules passing through a granulator ($n\bar{\theta}$), as a measure of the rounding effect, on the average shape index $\bar{\delta}_p$ of the final product

$$F_c = \frac{W}{W^*} \quad (0 < F_c < 1.0) \quad (5)$$

ここで W^* は同操作における造粒可能なバインダー・原料供給比 W の上限値とする。なお、製品の粒度特性に関する Eq.(3) についてはすでに前報⁵⁾にて検討しているの、ここでは割愛する。本報では、形状特性に関する Eq.(4) についての考察する。Eq.(4) に Eq.(5) の関係を代入すれば、

$$\begin{aligned} \bar{\delta}_p &= (\bar{\delta}_c - \bar{\delta}_s) F_c + \bar{\delta}_s \\ &= -(\bar{\delta}_s - \bar{\delta}_c) \frac{W}{W^*} + \bar{\delta}_s \quad (\text{ただし, } \bar{\delta}_c \leq \bar{\delta}_s) \end{aligned} \quad (6)$$

これより、 $\bar{\delta}_s > \bar{\delta}_c$ のもとでは、 $\bar{\delta}_p$ は W の増大にともない減少することを示している。なお、 $\bar{\delta}_s$ 、 $\bar{\delta}_c$ は造粒操作条件のほか、原料粉末およびバインダーの各物性によって大きく支配される値であると思われる。Eq.(6) の関係は、Figs. 3 および 4 の実験結果を説明しているものと言える。なお、Eq.(6) では、 $W/W^* = 0$ のとき $\bar{\delta}_p = \bar{\delta}_s$ 、 $W/W^* = 1.0$ のとき $\bar{\delta}_p = \bar{\delta}_c$ に相当する。しかし、 $0 < F_c < 1.0$ であり、 $W = 0$ では造粒は不可能である。このことを考慮すれば、Eq.(6) によって計算される $\bar{\delta}_s$ 、 $\bar{\delta}_c$ は本造粒モデルによって与えられる推定値の一つである。

Fig. 7 は、 $\bar{\delta}_p$ と W/W^* との実験結果を整粒効果と密接な関係をもつ操作変数 ($n\bar{\theta}$) をパラメータに示したものである。ここでは、粒度特性の場合⁵⁾と同様に本実験条件でも $W^* = 0.160$ を採用した。同図よりわかるように、実験値のばらつきは認められるが、いずれの ($n\bar{\theta}$) についても本造粒プロセスモデルをもとに導出された Eq.(6) の関係を満足している。また、同図の実験結果では、推定値 $\bar{\delta}_s$ ($W/W^* = 0$ における $\bar{\delta}_p$ の値) は ($n\bar{\theta}$) によって変化し、 $\bar{\delta}_c$ ($W/W^* = 1.0$ における $\bar{\delta}_p$ の値) はほぼ一定と見なすことができる。

ここで、推定値 $\bar{\delta}_s$ と ($n\bar{\theta}$) の関係をさらに検討するために、 $\bar{\delta}_c = 0.86$ (一定) と仮定し、各実験値 $\bar{\delta}_p$ と W/W^* との関係を用いて、Eq.(6) よりそれぞれの ($n\bar{\theta}$) に対する $\bar{\delta}_s$ の推定を試みた。その結果を Fig. 8 に示す。理論的には、 $\bar{\delta}_s \leq 1.0$ であるが、同図の推定値 $\bar{\delta}_s$ の中には $\bar{\delta}_s > 1.0$ の推定値が含まれている。これは、 W に対する $\bar{\delta}_p$ の実験値の散乱に起因するものと思われる。したがって、本報では、整粒効果と密接な関係を有する ($n\bar{\theta}$) の増大は、 $\bar{\delta}_s$ なる造粒粒子の球状化を促し、 $\bar{\delta}_s$ は ($n\bar{\theta}$) の増大にともない $\bar{\delta}_s = 1.0$ に漸近するものと仮定し、両者の関係を Eq.(7) にて近似することを試みた。

Fig. 7 Experimental relationships between $\bar{\delta}_p$ and W/W^* comparing with the correlation of Eq.(6), under various $[n\bar{\theta}]$ ($W^* = 0.160$)

Fig. 8 Relationships between $\bar{\delta}_s$ and $n\bar{\theta}$. $\bar{\delta}_s$ was calculated from Eq.(6) by using each of the experimental result ($\bar{\delta}_p$ and W/W^*) under various $[n\bar{\theta}]$. The curve was estimated from Eq.(9)

$$\frac{d\bar{\delta}_s}{d(n\bar{\theta})} = \beta(1 - \bar{\delta}_s) \quad (7)$$

ここで、 β は定数である。

$$\begin{cases} n\bar{\theta} = 0 \text{ のとき, } \bar{\delta}_s = \bar{\delta}_c (\text{const}) \\ n\bar{\theta} = \infty \text{ のとき, } \bar{\delta}_s = 1.0 \end{cases} \quad (8)$$

の条件を満足するものとして、Eq.(7) を解けば、

$$\bar{\delta}_s = 1 - (1 - \bar{\delta}_c) \exp(-\beta n\bar{\theta}) \quad (9)$$

を得る。ここで、実験結果をもとに、 $\bar{\delta}_c = 0.86$ とし、 β を求めれば、 $\beta = 1.2 \times 10^{-3}$ を得た。Fig. 8 中の曲線

Fig. 9 Comparison of $\bar{\delta}_c, \bar{\delta}_s$ estimated from Eq.(9) with $\bar{\delta}_{ce}, \bar{\delta}_{se}$ which are average shape index $\bar{\delta}_x$ of smaller granules ranging from 100–250 μm and larger ones ranging from 710–1180 μm , respectively

は、この $\bar{\delta}_c$, β を Eq.(9) に代入して算出した結果である。実験値の散乱が目立つが、両者の間にはかなりよい相関関係があるものと言えよう。なお、 β は $\bar{\delta}_s$, $\bar{\delta}_c$ と同様に、操作条件が一定ならば粉末原料およびバインダー特性によって与えられるものと思われる。次に、Eq.(9) の関係、特に $[n\bar{\theta}]$ に対する $\bar{\delta}_c$ の関係を実験的に検証するために、Fig. 2 にて示された x と δ_x の関係をもとに検討した。ここでは、 F_c が比較的小さく、 $\bar{x}_s$ なる粒子の得やすい造粒条件 ($W=0.05, 0.075$) のもとで生成された造粒粒子群を対象に検討する。すなわち、同実験結果において、球状造粒粒子群の代表として δ_x の大きい粒子径 $x=710\sim1180\mu\text{m}$ の粒子群を採用し、その形状指数を $\delta_x=\bar{\delta}_{se}$ とした。また、破碎造粒粒子群の代表として $x=110\sim250\mu\text{m}$ の微細造粒粒子を採用し、その形状指数を $\delta_x=\bar{\delta}_{ce}$ とした。Fig. 9 には、 $\bar{\delta}_{se}$, $\bar{\delta}_{ce}$ と $[n\bar{\theta}]$ の関係を Eq.(9) による推定値 $\bar{\delta}_s$, $\bar{\delta}_c$ と比較して示した。同図からもわかるように、実測値 $\delta_x=\bar{\delta}_{ce}$ と推定値 $\bar{\delta}_c=0.86$ とはかなり良い一致を示し、それらは $[n\bar{\theta}]$ に無関係に一定値を示すことが認められる。一方、実測値 $\delta_x=\bar{\delta}_{se}$ はいずれも推定値 $\bar{\delta}_s$ に比較して小さい値を示しているが、 $[n\bar{\theta}]$ の変化に対する両者の増

加傾向はほぼ一致している。なお、 $\bar{\delta}_{se} < \bar{\delta}_s$ であることは、 $x=710\sim1180\mu\text{m}$ の造粒粒子群の中にも $\bar{x}_s$ なる球状造粒粒子群のみならず、 $\bar{x}_L$ なる造粒粒子が破碎されて生成された非球状造粒粒子群が混入していることによるものと思われる。

以上の結果、最終造粒製品の平均形状指数 $\bar{\delta}_p$ は Eqs. (6) および (9) より、次式で与えられる。

$$\bar{\delta}_p = 1 - (1 - \bar{\delta}_c) \left\{ \left(1 - \frac{W}{W^*} \right) \exp(-\beta n\bar{\theta}) + \frac{W}{W^*} \right\} \quad (10)$$

Fig. 10 は、本造粒プロセスのモデル化により導出された Eq.(10) を用いて、造粒製品の平均形状指数 $\bar{\delta}_p$ と操作変数 $[n\bar{\theta}]$ との関係を W/W^* をパラメータに算出し、実験値と比較したものである。同計算では、実験より得られた $\bar{\delta}_c=0.86$, $W^*=0.160$, $\beta=1.2 \times 10^{-3}$ の各値を採用した。同図より、 W/W^* の比較的小さい造粒条件 ($W/W^*=0.19, 0.31$) の場合を除いては、計算結果と実験結果はかなりよい一致を示している。しかし、 $W/W^*=0.19, 0.31$ の場合では、いずれの実験値も計算値に比較して小さい値を示している。これは、バインダー・原料供給比 W が極端に小さい場合には、造粒粒子の保形強度が小さくなり、 $[n\bar{\theta}]$ の増加にともなう整粒効果も小さくなった結果、その球状化が低下したものである。さらに、前述したごとく、 W が限りなく $W=0$ に近づけば、造粒体の形成そのものも困難になり、その球状化はさらに困難になることが十分予測される。したがって、単一回転円錐型容器を用いた同時操作による微細球状造粒粒子の連続生成においては W/W^* に関する最適条件があるものと考えられる。

5. 結 言

1) 造粒粒子径と粒子形状指数との関係、およびバインダー・原料供給比と造粒製品形状指数との関係を中心に検討した結果、いずれも造粒粒子の微細化(粒

Fig. 10 Comparison of experimental results with the calculated curves by Eq.(10), derived from the present granulation process model

径<500 μm) が粒子の球状化を低下させることを得た。

2) これらの結果を、最終造粒製品が、粒子偏析効果により、粗大造粒粒子の選択的粉碎によって生成された微細非球状造粒粒子群と粉碎されずに回収された微細球状造粒粒子群との混合粒子からなるものと考え、

造粒プロセスモデルをもとに検討した結果、造粒製品形状特性は、造粒粒子の整粒効果に関係する容器内粒子の総流下回数の代表因子($n\bar{\theta}$)と粗大造粒粒子の生成量とその微細化に密接な関係をもつバインダー・原料供給比(W)によって与えられることを得た。

Nomenclature

B	: weight of balls charged	(kg)	$\bar{x}_i$	: granule size	(m)
D_H	: Heywood diameter of granule projection	(m)	$\bar{x}_L$	: average granule size(See. Fig 6)	(m)
D_P	: maximum length of a granule projection	(m)	$\bar{x}_P$	: average size of the final product	(m)
F	: feed rate of powder	(kg $\cdot\text{min}^{-1}$)	$\bar{x}_S$	: average granule size(See Fig.6)	(m)
F_c	: fraction of granules segregating to the grinding zone (A)	(-)	β	: rate constant in Eq(9)	(-)
$F(x_i)$	: weight fraction of granules having size x_i to total granules		δ	: shape index defined by Eq(1)	(-)
G	: feed rate of binder	(kg $\cdot\text{min}^{-1}$)	$\bar{\delta}_G, \bar{\delta}_S$	: average shape index of the granules having size $\bar{x}_G$ and $\bar{x}_S$ in the final product (See Fig.6)	(-)
H	: total hold up	(kg)	$\bar{\delta}_P$	: average shape index of the final product	(-)
n	: speed of rotation	(min $^{-1}$)	$\bar{\delta}_{G\bullet}$	: average shape index of non-spherical granules of the final product	(-)
W	: feed ratio of binder to powder	(-)	$\bar{\delta}_{S\bullet}$	: average shape index of nearly spherical granules of the final product	(-)
W^*	: critical feed ratio of binder to powder corresponding to upper limit of the ratio required for forming granules	(-)	δ_x	: shape index of granules having size x	(-)
x	: granule size	(m)	δ_{x_i}	: shape index of granules having size x_i	(-)
x_G	: average granule size(See Fig.6)	(m)	$\bar{\theta}$	: average residence time(= $H/(F+G)$)	(min)

References

- 1) Sekiguchi, I.: *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **26**, 586 (1989)
- 2) Jimbo, G.: *Chemical Factory*, **23**, 21 (1978)
- 3) Tanaka, T.: "Funtai Purosesu Nyumon", p.118, Kogakutosho(1981)
- 4) Sugimoto, M., N. Yokota and H. Kawamoto : *J. Chem. Eng., Japan*, **23**, 244 (1990)
- 5) Sugimoto, M., N. Yokota and M. Sugihara : *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **27**, 590 (1990)