円筒形貯槽からの粒子群流動音による 流量と粒子径の同時計測

日 高 重 助*, 下 坂 厚 子*, 三 輪 茂 雄*

Measurements of Flow Rate and Particle Size
by the Analysis of Flow Noise Radiated from a
Cylindrical Hopper

by

Jusuke HIDAKA[†], Atsuko SHIMOSAKA[†] and Shigeo MIWA[†]

The acoustic noise generated by flowing particles in a cylindrical hopper was studied to simultaneously measure the flow rate and particle size.

First, the pressure waveform of flow noise from flowing particles on an inclined plate was estimated on the basis of the generation mechanism of the impact sound when two particles collide on the plate. The frequency spectrum of the calculated pressure waveform agrees well with the measured one. Correlation between the flow rate and the pressure of the flow noise was obtained. The frequency of the flow noise was closely related to the diameter of the particle.

The frequency spectrum of the flow noise in a cylindrical hopper was similar to that of the flow noise from flowing particles on the inclined plate. From these results, the particle size and flow rate can be measured simultaneously by the frequency spectrum of flow noise from a cylindrical hopper.

Key Words : Instrumentation, Flow Rate, Particle Size, Acoustic Noise,
Frequency Spectrum

緒 言

粉体プロセスの自動化に際して流動粒子群の流量や粒度を連続的に計測することが必要であるが、まだその計測法が十分確立されるに至っていない。

粉体プロセスの中では、比較的大きな質量を持つ多くの粒子群が限られた空間内を激しく運動しており、それらの粒子は互いに激しい衝突あるいは摩擦を繰り返しているのでプロセス系外へ大きな音を放射する。すなわちこの音はプロセス内での粒子群の運動そのものにもとづいて放射されるのであるから、放射音の諸

量(音圧, 周波数成分)は粒子群の運動状態により決定される。したがってこの放射音の諸量と粒子群運動状態との関係が明らかになれば、プロセス系外から放射音を測定することにより粒子群運動状態の計測が可能になると考えられる。

この観点から、著者らはまず粒子群流動音の主要な成分である粒子群衝突音に着目し、その基本となる2個の粒子衝突音の発生機構を検討して衝突音の諸量と粒子特性および衝突パラメータとの関係を明らかにした¹⁾。つづいて平板上を一層で流動する均一な球形粒子群の流動音音圧波形の推定法を確立し、流動音の周波数スペクトルと流動粒子群の粒子径, 流速, 粒子間の平均衝突回数および粒子間距離等との関係を明らかにして流動音により粒子群流動状態の計測が可能であることを指摘した²⁾。

昭和62年12月19日受付

*同志社大学工学部化学工学科 (〒602 京都市上京区烏丸今出川)
TEL075-251-3847

[†]Dept. of Chem. Eng., Doshisha University, Kyoto 602

しかし前報²⁾の結果の中で、測定した流動音の周波数スペクトルに認められる粒子径に関係するピークの周波数が、平板上での2個の粒子衝突音にもとづく推算スペクトルにおける同じピークの周波数よりも低い周波数を示した。

本報では、はじめにこの原因を検討するために平板上での2粒子衝突音の諸量について詳しく検討した。つづいて前報までの結果にもとづいて、円筒形貯槽内で発生する粒子群流動音により流量および粒度の同時計測を試みたので報告する。

1. 実験装置および方法

1.1 平板上での粒子群衝突音の測定

2個の粒子衝突音の周波数スペクトルにおける最強ピークの周波数は、衝突粒子の粒子径に関係する¹⁾。一方粒子群流動音は流動中に起こる多数の2粒子衝突音の和であるから、流動音の周波数スペクトルには上述の2個の粒子衝突音の最強ピークと同じ周波数に粒子径に関係するピークが現れるはずである。しかし既報²⁾の実測スペクトルにおけるこのピークの周波数は推算スペクトルにおける周波数よりも低い値を示した。この原因として、(1)衝突粒子の周囲に第1層近接粒子が密着しているために、1個の衝突粒子が見かけ上数個の粒子に衝突していること、(2)平板上での2粒子衝突音の周波数が観測位置により大きく変わることが考えられる。前者の状態の衝突を起こすと衝突時の接触時間(加速度の作用時間)が長くなるので発生する衝突音の周波数は2粒子衝突音のそれよりも低くなる。しかしすでに報告している通り平板上を流れる粒子群の流動状態を高速度カメラで撮影した結果は、セルモデルの適用が可能であること、すなわち個々の粒子は十分分散して独立に運動していることを示しているためにこの原因は考えにくい。そこでFig.1に示す装置により平板上2粒子衝突音の測定を行い観測位置と衝突音の周波数との関係を詳細に調べた。測定方法は既報¹⁾と同じであるが、衝突2粒子に対して衝突音の観測位置と反対側にスポンジラバーを張った平板を設置して平板による反射音を含む2粒子衝突音を測定した。上からつるされた2個の球のうちの一方を他方の球に対する相対高さ h の位置から離して衝突させる。衝突における2球の接触時間 T を図中の電気回路を用いて測定し、次式により衝突速度 v_0 を算出した。

$$v_0 = \sqrt{2.94 \left(\frac{5\sqrt{2} \pi \rho_p}{4} \cdot \frac{1-\nu^2}{E} \right)^{2/5} \cdot \frac{a}{T}} \quad (1)$$

Fig.1 Experimental apparatus for measuring the sound from two colliding particles on a plate

ここで a は衝突粒子の半径、 ρ_p は粒子密度、 ν は衝突粒子のポアソン比、 E はヤング率であり、モデル粒子として本実験に使用した鋼球ではそれぞれ $\rho_p=7.8\text{kg/m}^3$ 、 $\nu=0.287$ 、 $E=2.09 \times 10^{11}\text{N/m}^2$ である。

衝突音は衝突軸と角 θ をなす位置にコンデンサー型マイクロフォン(Brüel & Kjær社製、4135型)を設置して測定した。マイクロフォンからの信号は、既報¹⁾と同じ増幅器と波形記憶装置を用いて周波数解析を行った。

1.2 平板上粒子群流動音の測定

粒子群流動音の推算周波数スペクトルと実測スペクトルを比較するために平板上粒子群流動音の測定を行った。その測定法は既報²⁾と同じである。

1.3 貯槽からの流動音の測定

Fig.2に示す装置により円筒形貯槽からの粒子群排出流動音の測定を行った。貯槽は内径240mm、高さ1400mmのPVC製で下部のオリフィス口径は可変である。Fig.2(b)に示すように貯槽下端より300mmの円筒壁に直径6mmの円孔を開け、その円孔に目開き50 μm のナイロン製ふるい網を張った。その円孔部に外部からの雑音を排除する目的で円筒壁に対して直角に同じPVC製のパイプを取り付け、その中にコンデンサーマイクロフォン(Brüel & Kjær社製、4135型)を設置した。

マイクロフォンからの信号は同じく増幅したのち、波形記憶装置に入力した後再生して周波数解析を行った。使用した試料は、ガラスビーズである。

Fig. 2 Experimental apparatus for measuring flow noise from cylindrical hopper

2. 結果および考察

2.1 平板上 2 粒子衝突音の周波数に対する観測位置の影響

Fig. 3 に示す通り、平板上で 2 粒子が衝突することにより発生する音の観測点 $M(r, \theta)$ における音圧 $p(r, \theta, t)$ は、衝突粒子 (1) および (2) からの直接放射音の音圧 $p_1(r_1, \theta_1, t'_1)$, $p_2(r_2, \theta_2, t'_2)$ とその平板による反

Fig. 3 Sound radiation from two colliding particles on a plate

射音との和で表される。ここで $p_i(r_i, \theta_i, t'_i)$ は衝突軸と θ をなす方向に衝突粒子 i から距離 r_i 離れた観測点での衝突粒子 i からの放射音圧であり、その推算式は既報¹⁾に示した。なお $t'_i = t - (r_i - a_i)/C$ であり、 t は時間、 C は音速である。

平板による反射音は、平板に対して衝突粒子と対称な位置にもう 1 組の衝突粒子の虚像を仮想し、この仮想衝突粒子 i' の放射音で表すことができる。したがって平板上 2 粒子衝突音の音圧波形は次式により推算できる²⁾。

$$P(r, \theta, t) = p_1(r_1, \theta_1, t'_1) + RU(t'_1 - Td_2)p_2(r_2, \theta_2, t'_2) + RU(t'_1 - Td_1')p_1'(r_1', \theta_1', t'_1'') + RU(t'_1 - Td_2')p_2(r_2', \theta_2', t'_2') + RU(t'_1 - Td_1'2)p_1'(r_1', \theta_1', t'_1'') + RU(t'_1 - Td_2'1)p_2'(r_2', \theta_2', t'_2'') \quad (2)$$

ここで、 p_1' は粒子 (1) を回折して測定点に到達する虚像粒子 (1') の放射音 (反射音) の音圧、 p_2' は同じく粒子 (2) を回折して到達する粒子 (2') の放射音圧、 $p_1'2$ は粒子 (1') の放射音が粒子 (2)、 $p_2'1$ は粒子 (2') の放射音が粒子 (1) を回折して測定点に到達する音圧を示す。また R は反射係数、 $U(t'_1 - Td_a)$ は単位ステップ関数、 $Td_2, Td_1', Td_2', Td_1'2, Td_2'1$ は粒子 (1) の放射音が測定点に到達する時間に対するそれぞれの回折波の到達時間遅れを示し、それぞれ次式で与えられる。

$$Td_2 = (L_2 - r_1)/C, \quad Td_1' = (L_1' - r_1)/C, \\ Td_2' = (L_2' - r_1)/C, \quad Td_1'2 = (L_1'2 - r_1)/C, \\ Td_2'1 = (L_2'1 - r_1)/C \quad (3)$$

ここで L_i は各音波の到達経路の長さであり、その計算法を Appendix に示す。

障害物のない自由な空間での 2 粒子衝突音の周波数スペクトルに認められる最強ピークの周波数は、主として粒子径に關係して決まり観測位置や衝突速度の影響は小さい。しかし平板上での 2 粒子衝突音では反射音の到達経路の長さが観測位置により大きく変動するのでその最強ピーク周波数が観測位置により変わる可能性がある。

Fig. 4 は平板上 2 粒子衝突音の音圧波形とその周波数スペクトルを示しており、図中点線で描いた波形は Eq. (2) による推算波形である。既報¹⁾で明らかにした通り、観測角度 θ が高い領域では球間での反射に起因して推算波形の音圧が低くなる傾向がみられるが、全体的に推算音圧波形、周波数スペクトルと実測値はよく一致している。

一方 Fig. 5 は平板上 2 粒子衝突音の推算波形 (実線)

Fig. 4 Pressure waveforms and frequency spectra of the sound from two colliding particles on a plate

Fig. 5 Calculated pressure waveforms and frequency spectra of the sound from two colliding particles

Fig. 6 Relationship between particle size and frequency of the impact sound between two particles

に対する直接放射音および各回折音の影響を示しており、図中の一点鎖線は2粒子からの直接放射音、2点鎖線および点線は粒子(1)と(2)を回折する反射音波の音圧波形である。周波数スペクトルにおける最強ピークの周波数と観測位置(r, θ)の関係は複雑で、 θ が高い領域では反射波の影響が強くなり高い周波数を示す。しかし θ が60度付近で直接放射音と反射音との強度が等しく、周波数スペクトルには同じ高さの2つのピークが現れる。さらに θ が小さくなるにつれ反射音が弱くなり次第に自由空間での2粒子衝突音と同じ周波数となる。この傾向は粒子径および衝突速度が変化しても同じである。以上のように平板上2粒子衝突音の周波数スペクトルにおける最強ピークの周波数 f_m は観測位置により変化するが、**Fig. 6**に示す通りいずれの観測角においても $f_m \propto D_p^{-1}$ の関係が成立しており、最強ピークの周波数は粒子径により決定されることがわかる。

2.2 平板上粒子群流動音

2.2.1 流動音の周波数スペクトル

Fig. 7は平板上を1層で流動する鋼球(粒子径 $D_p = 11.11\text{mm}$)とガラスビーズ($D_p = 16.5, 12.5\text{mm}$)における流動音の周波数スペクトルである。スペクトルの中に示したピーク(a)の周波数 f_a は、平板2粒子衝突音の周波数 f_m と等しく流動粒子の粒子径で決まる。さらにピーク(a)と(b)の強度比 I_a/I_b は粒子間衝突回数、ピーク(a)の広がり程度は流動粒子間の平均距離と強い相関を有する²⁾。

一方、**Fig. 8**は、**Fig. 7**に示した鋼球の流動音の周波数スペクトルを既報²⁾で示した流動音音圧波形推定法にもとづいて計算したものである。この図から明ら

(a) steel ball

(b) glass beads

Fig.8 Calculated frequency spectra of the noise radiated from flowing particles on an inclined plate

Fig.7 Frequency spectra of the noise radiated from flowing particles on an inclined plate

かなように、計算周波数スペクトルにおけるピーク(a)の周波数 f_a は観測対象粒子個数 N が増大するにつれ低周波数側へシフトする傾向がみられる。上述のとおり流動音音圧波形は平板上に分布する多くの流動2粒子衝突点から放射される音の和として計算される。このとき前節で述べたように流動音の構成単位である平板上2粒子衝突音の音圧は観測角度 θ が低いほど高く、その周波数スペクトルに認められる最強ピークの周波数 f_m は、反射音波が観測点に到達する経路の変化に起因

して低周波数側へシフトする。したがって流動音の音圧波形の推定に際して観測粒子数が少ない場合には、観測角度 θ が低い粒子衝突点が少ないために f_a が高くなり、観測粒子数が増すにつれ高い音圧を有する低周波数の音を加算されるために f_a が低周波数側へシフトすることになる。観測粒子 N が5600個のスペクトルは低周波数領域*1を除いてスペクトルの概形、ピーク周

*1) 低周波数成分が重畳される原因については2.2.3節で述べる。

波数ともに Fig.7 に示した実測スペクトルとよく一致している。観測粒子数を多くして計算したスペクトルにおいても前述の粒子径、流動粒子の平均半径および衝突回数とスペクトルから得る諸量との関係は同じである。

2.2.2 平板上流動粒子群の流動量と粒度の計測

平板上流動粒子群の流量(または平均流速 V)が増加すると、それに対応して個々の流動粒子の微視的速度 v および衝突回数も増大するので流動音の音圧が高くなる²⁾。Fig.9 は平板上流動粒子群の巨視的平均流速 V^{*2} と周波数ピーク(a)の音圧 P_a との関係を示しており、次式の関係が成立する。

$$P_a \propto V^n \quad (4)$$

$$P_a \propto D_p^{1.7} \quad (5)$$

指数 n は流動状態に対する壁の影響が粒子径により異なるので図からわかる通り粒子径により変化する。

粒子径と図中に示したピーク周波数 f_a の間には、2 粒子衝突音の結果と同じく次式の関係がある。

$$f_a \propto D_p^{-1} \quad (6)$$

Eqs. (4), (6) は流動音の周波数スペクトルにおけるピーク音圧 p_a および f_a により流量および粒子径が同時に計測できることを意味している。

2.2.3 円筒形貯槽における流動音の諸量と流量および粒度の関係

平板上を流れる粒子群流動音の諸量と流量および粒

Fig. 9 Relationship between sound pressure (Pa) of the flow noise and macroscopic velocity (V) of flowing particles on an inclined plate

*2) 流動粒子群のうちから任意に選んだ5個の粒子の流動速度を測定し、その平均値を巨視的平均流速 V とした。

Fig. 10 Relationship between flow rate and sound pressure from flowing particles in cylindrical hopper

度の関係が、実際の3次元貯槽でも成立することを確認するために、円筒形平底貯槽内を流れるガラスビーズの流動音を測定した。Fig.10 は流動音の音圧 P_T と流量 Q との関係を示している。ここで音圧 P は騒音計の指示値であり、前節の P_a とは異なり周波数解析を行う前の全音圧である。いずれの粒子径においても平板上の流動音と同じく次の関係が成立する。

$$P_T \propto Q^n \quad (4)$$

$$P_T \propto D_p^{1.7} \quad (5)$$

一方、Fig.11 は流動音の周波数スペクトルの例である。ピーク周波数 f_a およびスペクトルの概形は、約2kHz付近の周波数成分が高くなる程度で平板上流動粒子群のスペクトルとよく一致しており、前節の知見を適用して流量および粒度の計測が可能であることを示している。

さて平板上を1層で流動する粒子群からの流動音においても3次元貯槽装置内を流動する粒子群でも、2粒子衝突音に比較して低周波数成分が非常に高い。この原因は次の2点であると考えられる。

すなわち一般に貯槽装置内を流動する粒子群の流量あるいは壁圧が脈動することはよく知られている。貯槽の重要な機能のひとつは貯槽内の粒子群をある一点へ供給することであるが、その機能のために貯槽内の粒子群の流路が必ず排出口に向かって縮小されることになる。さきに著者³⁾らは上述の流量および壁圧の脈動がその流路の縮小に起因することを明らかにした。すなわち流路の縮小により流動粒子群は圧密と膨張崩壊を交互に周期的に繰り返している。このときの圧力変動は大きく、その周波数は粒子群の摩擦係数により定まるが、一般的には数100Hz以下である。

Fig. 11 Frequency spectra of the noise radiated from flowing particles in cylindrical hopper

もう一つの原因は、流動粒子群が円筒壁に衝突することによる音である。**Fig. 12**は粒子群を充填した円筒形貯槽の壁に同じ粒子を1個衝突させたときの衝突音の周波数スペクトルである。ほぼ流動音のスペクトルの低周波数成分と一致することがわかる*3。**Fig. 13**は流量 Q と粒子群相互の衝突に起因する周波数成分の音

Fig. 12 Frequency spectra of the impact sound between single particle and hopper wall

Fig. 13 Relationship between the flow rate of particles from cylindrical hopper and sound pressure (P_c) in characteristic frequency band of flow noise

Fig. 14 Relationship between particle diameter and frequency (f_a) of flow noise

*3) 貯槽壁に1個粒子を強く衝突させて得た**Fig. 12**には粒子群衝突音と同じ周波数領域に成分が認められ、実際の粒子群流動音の周波数スペクトルにもその影響が予想されるがその程度はいまのところ不明である。

圧 P_e との関係を示している。これらの間には Eq. (4) と同じ関係が成立するが、指数 n が大きい値となり Eq. (4) の関係に比べて粒子衝突音の周波数帯域の音圧変化は流量変化に鋭敏であることがわかる。また Fig. 14 は粒子径と f_a の関係である。これまでの結果と同様にやはり $f_a \propto D_p^{-1}$ の関係が成立する。以上の結果流動音の音圧により流量の計測が可能であることを示しており、しかも低周波数の環境騒音に邪魔されことなく特定高周波数帯域の音圧変動を用いて計測できることを示している。

結 言

貯槽から発生する粒子群流動音により粒子群の流量と粒度を連続的かつ同時に計測することを試みた。粒子群流動音は流動粒子相互の衝突および流動粒子と貯槽壁との衝突により発生するが、本報では前者の衝突音を用いて計測した。

まず粒子群衝突音に関する基礎的理解のために、平板上 2 粒子衝突音音圧波形の推定を行い、その結果をもとに平板上を 1 層で流動する粒子群の音圧波形の推定を行った。流動音の実測周波数スペクトルと推定スペクトルはよく一致し、周波数スペクトルに認められる最強ピークの音圧 p_a およびその周波数 f_a は粒子群の平均流速と粒子径に関係することがわかった。

実際の円筒型貯槽の排出流動音の周波数スペクトルも 2 次元的な平板上粒子群流動音のスペクトルと非常によく一致しており、上述の知見を用いて流動音により流量および粒度の計測が可能であることを明らかにした。

Appendix 反射波の回折経路

平板上 2 粒子衝突音の音圧波形の厳密な推算は極めて複雑な計算になるので、本報告では Fig. i に示す到達経路を持つ 6 つの波の和で表した。それぞれの到達経路の長さは Fig. i および Fig. 3 に示す記号を用いて次のように表される。粒子 (1), (2) からの直接放射音の経路 L_1, L_2 は次式で与えられる。

$$L_1 = r_1 = \sqrt{(r \cos \theta - a)^2 + (r \sin \theta)^2}$$

$$L_2 = r_2 = \sqrt{(r \cos \theta + a)^2 + (r \sin \theta)^2}$$

衝突軸と観測点とのなす角はそれぞれ次式となる。

Fig. i

$$\theta_1 = \tan^{-1}\{r \sin \theta / (r \cos \theta - a)\},$$

$$\theta_2 = \tan^{-1}\{r \sin \theta / (r \cos \theta + a)\},$$

$$\theta_3 = \theta_5 = \tan^{-1}\{(r_1 \sin \theta_1 + 2a) / r_1 \cos \theta_1\},$$

$$\theta_4 = \theta_6 = \tan^{-1}\{r_2 \sin \theta_2 + 2a / r_2 \cos \theta_2\}$$

また反射波が粒子 (1), (2) の表面に沿って移動する距離に対する粒子の中心角 r は次式となる。

$$r_2 = (2\pi/3) - \{(\tan^{-1}\sqrt{r_1^2 - a^2}/a) - \theta_1\}$$

(ただし $\theta_2 < \pi/6$ とするとき),

$$r_3 = \pi/6 - \{(\tan^{-1}\sqrt{r_1^2 - a^2}/a) - \theta_1\}$$

(ただし $\theta_3 > 3\pi/4$ のみ),

$$r_4 = 7\pi/6 - \{(\tan^{-1}(\sqrt{r_2^2 - a^2}/a) + \theta_2)\},$$

$$r_5 = 7\pi/4 - \{(\tan^{-1}(\sqrt{r_2^2 - a^2}/a) + \theta_2) - \theta_2\} - \tan^{-1}\sqrt{7},$$

$$r_6 = 3\pi/4 - \{(\tan^{-1}(\sqrt{r_1^2 - a^2}/a) - \theta_1) - \tan^{-1}\sqrt{7}\}$$

以上の式を用いて 6 つの音波の観測点への到達経路の長さ L_i は次式で表される。

$$L_1 = r_1, L_2 = r_2 (\theta_2 < \pi/6), \sqrt{r_1^2 - a^2} + a(\sqrt{3} + r_2) (\theta_2 < \pi/6),$$

$$L_3 = \sqrt{(r_1 \sin \theta_1 + 2a)^2 + (r_1 \cos \theta_1)^2}, (\theta_3 \leq \pi/3), \sqrt{r_1^2 - a^2} + a(\sqrt{3} + r_3), (\theta_3 > \pi/3),$$

$$L_4 = \sqrt{r_2^2 - a^2} + a(\sqrt{3} + r_4),$$

$$L_5 = \sqrt{r_2^2 - a^2} + a(\sqrt{7} + r_5),$$

$$L_6 = \sqrt{(r_2 \sin \theta_2 + 2a)^2 + (r_2 \cos \theta_2)^2}, (\theta_4 \leq \pi/4 - \tan^{-1}(1/\sqrt{7}), \sqrt{r_1^2 - a^2} + a(\sqrt{7} + r_6), (\theta_4 > \pi/4 - \tan^{-1}(1/\sqrt{7}))$$

本報で示した音圧波形の推算において、反射係数 R は 1 としている。

Nomenclature

a_i : radius of spherical particle(i)	[m]	E : modulus of elasticity	[N/m ²]
C : sound speed	[m/s]	f_a : frequency of peak(a) in frequency spectrum	[kHz]
D_p : particle diameter	[mm, m]	f_m : frequency of maximum peak in frequency	

spectrum of impact sound from two colliding particles	[kHz]	r : distance between particle and observation point	[m]
I : intensity in frequency spectrum of sound	[dB]	T : contact time between two colliding particles	[s]
L_i : pass length of the diffraction wave of the sound radiated from the particle(i)	[m]	T_d : difference in time between the arrival of the sound from the particle(1) and (i)	[s]
m : mass of spherical particle	[kg]	t : time	[s]
N : number of specified flowing particles	[-]	V : flowing rate of particles on an inclined plate	[m/s]
P_a : sound pressure of peak(a) in frequency spectrum of flow noise	[Pa]	v_0 : impact velocity of two particles	[m/s]
P_c : sound pressure of characteristic frequency band	[Pa]	v : microscopic velocity of a flowing particles	[m/s]
P_r : sound pressure of flow noise	[Pa]	γ : angle	[deg]
p_i : sound pressure generated by particle(i)	[Pa]	θ : angle	[deg]
R : coefficient of the reflection of sound	[-]	ν : Poisson's ratio	[-]
		ρ_p : particle density	[kg/m ³]

References

- 1) Hidaka, J., A. Shimosaka and S. Miwa : *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **24**, [10] 655 (1987)
- 2) Hidaka, J., N. Yonekubo, A. Shimosaka and S. Miwa : *Kagaku-Kogaku Ronbunshu*, **14**, [1] 71 (1988)
- 3) Hidaka, J., H. Imai and S. Miwa : Preprint of the Annual Meeting, Soc. of Powder Technol., Japan, p. 30 (1987)