混合度，混練度および水分量の測定

佐 藤 宗 武*；宮 南 啓*
Munetake SATOH Kei MIYANAMI

1. はじめに

粉粒体が他の成分(固体，液体，気体成分)と混じり合ってゆく過程および分散された状態を把握することは各種装置の性能評価や操作条件の決定，プロセスの制御のみならず製品の諸特性を評価するうえで重要なことである。プロセス中の粉粒体の状態量は粉粒体のバルクの性質，粒子自体の持つ諸物性および外的な条件(力の加え方など)によって変化する。このような状態量の変化は力，圧力，温度，振動等のように直接的に検出端(センサー)に働きかけるものと，光，電波，磁場，放射線などの外的な刺激に反応して共鳴，吸収，反射などとして検出されるものがある。ここでは，混合，混練の度合および水分量の諸状態量の測定方法についていくつかの例をもとに利用される原理やセンサー類などに触れる。

2. 混 合 度

粉粒体の混合は二種以上の異った性質の物質を分散均一化することであるが，要求される混合の度合あるいは均一度はそれぞれの分野，扱う材料の種類，製品によって変ってくる。たとえば，異なる粒子が全体として統計的に均一分散状態にあれば良い場合，ある定った量中に決められた量がある精度内で含有されねばならない場合，あるいは単一粒子の周囲を他の微粒子が規則配列してコーティング状態を形成するいわゆるオーダードミクスチャと呼ばれる新粒子を生成する場合，さらに，粒子同士を付着，接着あるいは融着，粒子内に他の粒子を埋め込んでしまうような状態，剪断力による展延変形，微粒子化などを要求する粒子そのもの

の性状を改質して機能的な粒子を設計する場合等々，目的によって様々なケースが考えられる。このように粒子自身の性質，目的とする混合物の状態が種々異なる場合に対して，いかにして混合物の組成を測定し，どのような基準で混合状態を評価してゆくかが重要な課題である。

混合物の組成あるいは着目成分の含有量を求めて混合の進行状態や最終混合度を測定するために従来から種々の手法が開発され用いられてきた。

混合物中からスポットサンプルを採取し計数，重量測定，化学分析などにより成分の絶対量を測定する直接法，また，光学，電子顕微鏡などによる写真測定や画像処理計測などの準直接法，混合物の電気，磁気特性，表面特性，力学物性などの変化を測定する間接的な混合状態の評価方法などあり，それらの例を表1にまとめて示した。分析化学や物理計測の分野ですでに組成の定性，定量に一般的に使用されている専用機器類の解説はそれぞれの専門書に譲るとして，ここでは

表1 混合状態評価のための計測例

直接測定	計数，重量，容量測定 写真，光学または電子顕微鏡画像処理，化学分析
電気・磁氣的特性	電気伝導度，体積抵抗率，誘電率 誘磁率，磁化率
表面特性	比表面積，湿潤熱，吸着量，形状
物理化学的特性	音波，振動伝播特性 X線，紫外線，可視光，赤外線， 電磁波等の吸収，透過，反射散乱
力学特性	付着力，摩擦特性の測定 トルク，電力，電流 レオロジー特性
そ の 他	五 感

昭和61年3月25日受付

* 大阪府立大学工学部化学工学科

(〒591 大阪府堺市百舌鳥梅町4-804)

TEL 0722-52-1161 内2327

混合物の組成の変動を比較的容易に間接的に取らえることができ、混合現象の基礎的な解明や装置性能の評価にも用いられる可能性のあるいくつかの例について概説する。

2.1 光学的手法による混合度測定

最近、半導体センサやマイクロコンピュータの急速な発達に伴ってプロセス中の粒子の運動状態や組成(濃度)変動、混合状態の測定に光学的手法を応用する試みがいくつか見られるようになった。色調や明暗の異なる成分の粉粒体混合物に光を照射してその反射強度から組成比や混合度を測定する方法はかなり古くから色差計や白度計として用いられてきた。近年高透過率のガラスまたはプラスチック製のオプティカルファイバーが開発され比較的容易に入手可能になった。これを粒子層に直接光を導入して透過光や反射散乱光を検出することにより粒度分布、流速、濃度分布、混合度などが測定されるようになった。

図1には比較的粒子濃度の低い気・固あるいは固・液二相流の粒子速度および濃度測定に利用される光透過型プローブの例を示した。(a)は一对のプリズム付きのファイバでプリズム間の小空間の粒子濃度を、(b)は二対のファイバを用いて粒子の通過速度を検出する。透過光の場合、粒子濃度と光強度の間の関係はBeer-Lambert 式が良く用いられるが広い濃度範囲では成立しないので注意を要する。流速測定の原理は第一対目のファイバ間を粒子が通過して光路を遮断したときのパルス信号と第二対目のパルスの間隔を計測することで行なわれる。この原理を応用して多数のファイバ列を用いて光信号を図2のようなリニアイメージセンサ(フォトダイオードを一列に並べたセンサアレー)に導き粒子の流速、方向などを含むフローパターンを自動計測処理するシステムも開発されている。

粒子濃度が高い範囲では反射型プローブが良く用いられる。図3に示すように光をファイバで粉体面に導き、そこでの反射光を再びファイバで光電管やフォトダイオードに導く方式である。(a)はシングルファイバ方式でファイバの一端から光を送り他端面での反射光

図1 光透過型プローブ

図2 リニアイメージセンサ

図3 光反射型プローブ

を同一ファイバで逆送し途中に置いたハーフミラーでフォトセンサに導く、(b)は多芯型ファイバを一对先端で束ねたもので端面は混合型、二分割型、同心円型などに整えたもの、(c)は単芯型ファイバを一对にしたもので平行型およびファイバ端面にレンズまたは角度を付けて、ある点に焦点を合わせるようにしたもの、(d)は文字やマークリーダーなどに用いられるファイバを数組平行に並べたもので受光側は図2のようなリニアイ

メージセンサに接続した形状のもの、(e)パイプの先端を45°にカットしてガラスを貼り付け内部に二本のファイバを挿入したもの、また側方を検出するために鏡を付けたもの、など、測定する対象物に応じて種々の工夫がなされている。いずれにしても検出面(光照射面)上での粒子の充填状態、光の照射角度、光の波長などが反射光強度に直接影響するので静止状態および流動状態において既知の組成の粉粒体で検量線(組成-出力信号)を得ておき、さらに、同一組成での測定値の揺らぎの範囲(標準偏差など)を十分に把握しておく必要がある。図4には先に述べた図3(e)型のプローブを6本粉体の流路に挿入する連続混合機用マルチプローブを示す。これを連続混合機の出口に設置し、混合機から連続的に流出する混合物中の着色成分を流路の断面で測定すると図5のような組成の時間的な微小変動が得られこの変動幅の大小により混合の良否が判定できる²⁾。

光源とファイバの透過特性をうまく組合せてそれぞれの特徴を生かした検出方法が考案されている⁴⁾。図6に測定方法の概略を示したが、光源に紫外線ランプを用いて石英ファイバで粉粒体を照射する。トレーサ粒子にはあらかじめ水溶性蛍光染料を付けておき、紫外線によって蛍光(可視光)を発させる。この蛍光を紫外線を通さないプラスチック(PMMA)製ファイバによって光電子増倍管に導きトレーサ粒子のみの信号を得る方法である。

2.2 光学的手法を用いた混合度測定用システム例

混合度計測のシステムの概略は図7に示したように光源、プローブ、受光部、増幅器、A/D変換器、サンプリングの制御と混合度演算用のマイクロコンピュータから成っている。光検出部は周囲の光や他のプローブの光等の外乱に妨げられずに目的の信号を精度良く検出する(S/N比を上げる)ことが必要なので、光源に発光ダイオード(GaAsP/GaP型、580nm波長)

図4 連続混合機用マルチプローブ

図5 連続混合機出口の組成変動

図6 紫外線蛍光を利用した測定法

を使用し固有の周波数で点滅させ、受光部(GaAsP型フォトダイオード)では光源と同一の周波数、位相の光のみを検出するようにフィルターと同期整流回路が

図7 光学式混合度連続測定システム

図8 二成分粉体混合物の反射特性

組み込まれている。A/D変換器は12ビット8チャンネルでRS-232Cで8ビットマイクロコンピュータに接続されている。

図8にいくつかの粉粒体の組み合わせによる混合組成比と出力電圧の関係を示した。粉粒体の種類により反射特性が鋭敏に変化する組成範囲がある。図9にはこのシステムを用いて攪拌型混合機内の粉粒体の流動と混合状態を5本のプローブでオンラインで測定した結

図9 混合機内の粉体の混合過程
(a) 濃度の時間的変動 (b) 混合曲線

果の一例を示した³⁾。図9(a)においてA～Eは混合容器内のプローブの位置を表わしており、容器内各所での粉体の均一化過程が場所によって異なっていることが明確に測定されている。また図9(b)に示すように混合曲線から混合速度、最終混合度およびそこに到達する時間などがわかる。

2.3 色彩による検出

物質の色調(色相, 彩度)は前述の明暗(明度)だけの持つ情報よりもはるかに多くの情報量を含んでいる。図10(a)は白色光を粒子層表面に照射しその反射光をプリズムまたは格子によって分光した後方のリニアダイオードセンサで各波長(色)に対する出力を得ようとする装置の概略である。プリズムを回転させればフォトセンサーは一個ですむが機械的な可動部が必要となる。図10(b)はアモルファスシリコンフォトダイオードを用いた三色分解法を利用した色彩計の例である。

図10 カラーアナライザ(a)分光型(b)三色分解型

図11 アモルファス集積型カラーセンサとその分光感度特性

図 12 二、三成分系混合物の色度図

センサ部にはたとえば図 11 に示すような 3 個のフォトダイオードを一枚の基板上に付け、それぞれに赤、緑、青の三原色フィルタを付けた構造のものを使用し、反射光の三色の出力を処理して種々の表色系（たとえば XYZ 表色系 (CIE 1931)、 $L^*a^*b^*$ (CIE 1976) あるいはマンセル表示) に変換する。

図 12 に異った色に染色した顆粒状乳糖の混合による色度変化の例を示した。使用した色の組合せは互に補色に近い赤色と緑色であり、各染色粒子を種々の比率で混合して色度 ($L^*a^*b^*$) を測定した後、第三成分である青色粒子を添加した。混色による明度変化をあらかじめ補正しておけば三成分系の組成検出も可能になる。色相変化による微妙な混合度の差異を検出する試みが二成分粉体系を用いて行なわれた報告もある⁹⁾。

2.4 動力、物性変化からの測定法

粉粒体に異った物性の第二成分を添加すると粒子のマクロな集合状態、充填状態が変化したりミクロな表面状態などが変化し混合装置の所要動力（電力やトルク）に反映される場合がある。図 13 には一定速度で搅拌されている乾燥粉粒体に一定量の水を短時間に添加した場合の水分の均一化過程を搅拌トルクおよびサンプリングによる混合度の変化を比較して示した⁶⁾。水分が次第に分散して均質な湿潤状態に到達する過程は搅拌トルクの変動曲線としてとらえられている。また、珪砂などの無機粉体に高分子ワックス粉末やタルクなどの微粉を添加したときの、混合あるいはコーティング進行時の粉体層の摩擦特性の変化が搅拌トルクの変化として測定され、混合やコーティング過程の評価の一指標として用いる試みがなされている^{7,8)}。こ

図 13 トルク変動曲線と混合曲線

のような混合の進行に伴って粉体の集合状態や物性が変化することによる搅拌トルク、所要電力の変動は次の混練状態の評価方法の一つとしても検討されている。

3. 混練度

混練は粉粒体に少量の液体（粘結剤、ペンデュラ域～キャピラリ域）を添加して粒子の表面を被覆し均一な可塑物質あるいはペースト状物質を作る操作、高粘性物質に固体微粒子や液状物質を練り込む操作および剪断力により固体表面状態を改質しつつ他の物質を付けてゆく操作である。したがって粉粒体のマクロな混練の進行状態の評価には基本的に先に述べた混合度の測定手法表 1 も用いられるが、その他に混練物そのもののレオロジカル特性、成形体あるいは最終処理までの材料の物性、性能の評価も重要であり、扱う材料の種類、分野によっては独特の評価方法があり、五感や経験に依存するところも多くあると言われている⁹⁾。したがって混練操作において混練過程の特徴や混練の状態が装置や混練物そのもののどのような所に、どのような現象として現われているかを知ろうとすると、単一の現象のみを注目してもなかなか本質を見究めることが難しい場合が多い。また、いくつかの現象が複合し互いに関連して現われる場合があるためできるだけ多くの計測によって情報を収集し、混練物の性質と操作条件、装置条件などとの因果関係を考察してゆくことが大切である。このような目的のために計装された連続混練装置の例を図 14 に示した。また、表 2 には混練物の状態を評価するのに役立つ可能性のあるいくつかの測定項目例を掲げた。以下には磁性粉体の混練実験から数種の測定結果を総合して粒子の混練・分散状態を評価した例を紹介する。

図 14 連続混練装置の計装例

表 2 混練状態評価のための計測例

混練前の材料物性	固体成分	粒度, 粒度分布, 形状, 色 真および見掛け密度, 安息角 摩擦係数, 硬度, 引張破断強度 比表面積, 融点, 分解温度
	液成分	粘度等のレオロジー特性 界面張力, 温度依存性 沸点, 分解温度等
混練中の装置からの情報	トルクまたは電力, 温度分布, 圧力分布, 音響, 振動, 揮発成分の有無等	
混練物の性状	湿潤状態 (グリーン状態)	レオロジー特性, 五感 粒径, 粒度分布, 形状, 色 およびその変化 見掛け密度, 引張破断強度 圧縮特性, 成形性, 流れ度 空隙率分布, 含液率等
	成形, 焼成体	膨張, 収縮率, 機械的強度 (引張, 圧縮, クリープ, 摩耗等) 電気的特性 (抵抗, 誘電率, 帯電特性等) 磁気特性 (磁化率, ヒステ リシス保磁率等) SEM, X線マイクロアナ ライザ等表面分析

3.1 磁性粉体の混練と分散状態の評価^{10,11)}

高密度記録材料の開発のために磁気テープの粒子がますます微粒化している。このような微粒子を高分散させるには, 結合剤樹脂と磁性粉体の混練操作が前処理として重要である。使用した混練装置は図 14 に示

した二軸式セルフクリーニング形成で槽長 $L=0.6615\text{ m}$, 直径 $D=0.05\text{ m}$, 内容積 $V=1.16 \times 10^{-3}\text{ m}^3$ である。磁性粉体は $d_p=0.5\text{ }\mu\text{m}$, $\rho=5160\text{ kg/m}^3$, $\rho_b=633\text{ kg/m}^3$ である。溶剂量 S_r を変化させて得られた混練トルク T の時間的な変化の測定例を図 15 に示した。時間 t が 1500 秒以上では定常トルク T_s を示しており, 混練状態が定常状態になり, また, T_s の値は S_r が小さい程大きく, 有効に混練されているものと思われる。そこで, T_s を示した時点以降に混練物を採取し, 乾燥, 粉碎後 $500\text{ }\mu\text{m}$ 以下の粒子について粉体層としての引張強度 $\bar{\sigma}_{x,T}$ を測定した。

図 16 に $\bar{\sigma}_{x,T}$ を樹脂量比 B/P をパラメータとして示した。これより, 引張強度は樹脂量が多い程小さく, 樹脂が磁性粉体を良好に被覆し, 良い混練状態であるといえる。このことは走査型電顕 (SEM) の観察結果からも確かめられている。つぎに混練物を一定時間 D_t 希釈分散させて磁性塗料として塗布した場合の光沢度 L_d の結果を図 17 (a), (b) に示した。両図から, 樹脂量比 $B/P=20\%$, 溶剂量 $S_r=28.8\%$ において光沢度が高

図 15 混練トルクの時間的な変化

図 16 引張強度の測定結果

図 17 塗膜の光沢度 (a) 樹脂量変化
(b) 溶剂量変化

く、良好に分散されていることがわかった。図 18 には上記の条件で得られた磁性塗膜の X 線マイクロアナライザ(XMA)のフローチャートを示した。XMA による分散性の評価基準は元素の偏りを表す CV 値で与えられ、CV 値が小さい程一様な分散状態にある。磁性塗膜表面の鉄の CV 値は 4.1 % であり他の条件で得た塗膜の値より小さかった。これらの結果から、巨視的な混練トルクの変動状態によって、微視的な磁性粉の分散状態を評価できることがわかった。

3.2 澱粉スラリーの糊化反応^{12,13)}

ここで使用した混練装置は垂直円筒容器内に偏心させて三角柱形ロータを取り付けた形式で容器壁とロータのクリアランスを調節することによって剪断効果を変化できる。まず、粒径 2~40 μm の小麦澱粉粒子を水中に 40 wt % で均一分散してスラリー状にして置き、所定の濃度の水酸化ナトリウム水溶液を添加して糊化反応を開始させる。図 19 にはロータ混練動力の時間的変動を示した。澱粉スラリーにアルカリを添加した

図 19 糊化反応に伴う混練動力の時間的変化

図 18 X 線マイクロアナライザのフローチャート

図 20 生成糊のレオロジー特性

時点から反応が進行しゲル状物質が局所的に生成してトルクは増大する。そして最大値を示した後、剪断作用でゲルが解されて次第に均一なゾルになってゆく過程が動力曲線に反映されている。ロータの回転速度すなわち剪断速度が変化すると同じ澱粉スラリーでも生成するゾルの均一度および見掛け粘度が異なっている。生成したゾルの物性を調べるために回転二重円筒型レオメータで定剪断速度 (100 s^{-1}) で剪断力 τ を測定したところ 図 20 に示すように、高速度で混練した場合に得られる糊は剪断力 τ が大きく、サンプル間のバラツキの少ない均質なものが得られている。ロータとしてパドル翼を用いた場合も同様の傾向を得た。このように混練過程および混練状態を混練トルクまたは動力およびレオロジカル特性から評価できる。

4. 水分量

粉粒体あるいは固体材料中において水分は種々の状態で存在することが知られており、従来からその分類法が提案されているが必ずしも明確に定義できるものばかりとは言えない。便宜的なものとしては、(イ)粒子間や固体細孔内の空間に水蒸気で存在するもの、(ロ)粒子表面、開細孔内の活性点に数分子層以内で吸着された結合水で結合時に湿潤熱を伴うもの、(ハ)気相の水蒸気と平衡状態で吸着された水分で比較的弱い結合水、(ニ)粒子間の接触点付近に毛管現象で保持された付着水および自由水分、(ホ)物質中の結晶水などとして存在する化学的に結合した構造水、などと分類される場合がある¹⁰⁾。水分量を測定する場合、どのような状態の水分を検出するので測定原理の選択および測定量の評価が異なってくることもある。

水分量の測定方法には加熱乾燥による減量法や化学分析、熱天秤法などの絶対量を直接求めるものや、電

表 3 水分量の計測

乾燥重量法	熱源と天秤などによる絶対法
化学分析法	カルフィッシャー試薬
相対湿度法	平衡雰囲気湿度の測定 (多くの湿度測定法がある)
誘電率式	高周波による測定
赤外線法 (吸収)	水素・酸素結合の共鳴を利用 後方散乱型、透過型
マイクロ波式	水分子の回転を伴う共鳴 電磁エネルギー吸収
中性子式	高速中性子の水素原子との衝突
その他	アルミナ、シリカゲル、モレキュラーシーブ等による吸着熱の利用 五酸化リン膜-白金電極による電解電流の利用 有機薄膜と水晶共振器による周波数変動の利用等

磁波や放射線などを照射して吸収や減衰から間接的に水分を求めるものなど種々の原理に基くものが開発され品質管理やプロセスの制御に導入されているものもある。表 3 には水分測定法のいくつかの例を示し、以下に代表的な測定原理などを概説する。

4.1 誘電率式¹⁰⁾

水の誘電率は空気(実際には真空中)の 1 に対して約 80 と非常に大きく、被測定物中の水分の量によってその値が変化し水分計に応用される。測定は一对の電極間に材料をはさみ、数 KHz~数百 MHz の高周波電源を用いて誘電率を求める方式である。測定値は水分率の外に材料の誘電率、温度、極板間の量と充填状態の変化の影響を直接に受ける。図 21 には 2 つの異なる電源周波数を用いて測定部の材料重量を補正して水分率を出力するようにした例を示す。粉粒体などの連続測定には電極間の充填状態をいかに一定に保つかが精度に大きく影響され、また静電気ノイズの対策も必要

図 21 誘電率式水分計

となる。

4.2 マイクロ波法

マイクロ波を水分に当てると水分子の回転を伴った共鳴によって吸収減衰が起る。特にS帯(2450 ± 30 MHz), X帯(10375 ± 100 MHz)およびK帯(22000 MHz 付近)などに強い吸収帯がある。水分量の増加によるマイクロ波の透過減衰は指数関数関係であり, この原理を水分計測に利用する。使用するマイクロ波の波長が比較的長い($0.01 \sim 1$ m)ので導波管(照射側, 受波側)の間隔を大きくとれ非接触で測定できるほか, 検出端と材料の距離の変動誤差は小さい。測定値は材料の種類, 温度, 充填率, マイクロ波の漏洩, 乱反射などの影響を受ける。連続測定の場合には図22のように γ 線型重量計と併用して水分率を演算して出力する装置も用いられている。図23に種々の物質中の水

図22 マイクロ波水分計(γ 線型重量計付)

図23 物質中の水分によるマイクロ波の減衰特性

図24 二波長型赤外線水分計

分によるマイクロ波減衰特性を示した。

マイクロ波法には透過型の他に共振型のものがある。これは特殊な共振セルを用いて薄膜中の微量水分によって共振周波数の変化を検知するもので高感度である。

4.3 赤外線法

近赤外領域の電磁波($1.3 \sim 15 \mu\text{m}$)はマイクロ波よりもさらに短波長で, 水分子の水素-酸素間振動を起こし, $1.43, 1.94, 3.0 \mu\text{m}$ の波長は共鳴点で著しく吸収される。このことを利用して二波長あるいは三波長を用いる反射型もしくは透過型の水分計が開発されている。

図24は二波長型赤外線水分計の概略を示した。赤外線源Aは水分に吸収される $1.94 \mu\text{m}$ を発し, Bは水分にはほとんど吸収されない波長たとえば $1.80 \mu\text{m}$ を発するとする。被測定物にABを交互に照射しその反射光を赤外線センサで検出し同期整流して(Aの信号)/(Bの信号)を求めるとノイズ分を打ち消した水分のみの信号が得られる。三波長型では被測定物母材(粒子など)によって吸収される波長の赤外線を第3線源としてBを基準として外乱の入らない水分率測定をするものである。いずれも非接触で連続測定が可能で β 線秤量計などと組合せて精度の向上が計られている装置もある。

4.4 中性子線法¹⁶⁾

ラジウム・ベリリウム, アメリシウム・ベリリウム系の放射線源からは数MeVの高エネルギー高速中性子を放射している。この高速中性子は測定物中の各原子核と衝突を繰り返しながらエネルギーを失ってゆき最終的に熱中性子(0.025 eV)になる。エネルギーの失いは質量の小さい水素原子が最大で約19回の衝突で3 MeVから 0.025 eVに減ずる。測定原理は図25に示すように高速中性子が減速して生成した熱中性子をプローブ中に組込まれた BF_3 熱中性子センサで高速中性子とは選別検出し, 増幅して計数管やLiIシンチレ

図 25 中性子水分計の原理(内挿型プローブ)

ーション管などで検出定量される。検出プローブには表面型、挿入型および透過型などがあり、透過型は高速中性子そのものの減衰を測定する方式で r 線密度計などと組合せて用いられる。

この方法は、非接触で迅速に測定でき測定有効体積が比較的大きいので平均的な値が安定して得られる。しかし、中性子は水以外の形で存在する水素原子にも

応答するので、水以外の形の水素を等価水分として補正する必要がある。

5. む す び

混合度、混練度および水分量の測定について、それらの状態量の検出に利用できるいくつかの原理と応用例を紹介した。取り扱う材料、そのプロセスが利用される分野によって計測、評価方法に独特な手法が導入されている場合も多いと思われるが、いずれにしてもどのような状態量をどのような原理に基いて測定しているかを明確にすることが大切である。最近、新素材を応用した高性能のセンサ類が数々開発されており、マイクロコンピュータと組み合わせることにより、混合混練現象から発する複雑な信号をキャッチして、有用な情報を抽出する技術が積極的に活用されるようになるであろう。

引 用 文 献

- 1) 上野満男, 大島伸夫, 本吉孝正, 白坂富美夫, 若林俊克: 化学工学論文集, **5**, [3], 318 (1979)
- 2) 矢野武夫, 佐藤宗武, 峰下豊: 粉体工学研究会誌, **9**, [4], 244 (1972)
- 3) 佐藤宗武, 出口雄一郎, 小村修司, 宮南啓: 粉体工学会誌, **22**, [2], 79 (1985)
- 4) Baba T., M. Nakajima, S. Morooka and H. Matsuyama: *J. Chem. Eng. Japan*, **17**, [3], 275 (1984)
- 5) Bannister P. and N. Harnby: *Powder Technology*, **36**, 275 (1983)
- 6) 佐藤宗武, 吉田純二, 宮南啓: 粉体工学会誌, **20**, [10], 604 (1983)
- 7) 寺下敬次郎, 宮南啓, 小西孝信, 吉田純二: 材料, **30**, 873 (1981)
- 8) 佐藤宗武, 藤本孝志, 宮南啓: 第23回粉体に関する討論会要旨集 No. 4, p. 11, 名古屋 (1985)
- 9) 橋本建次: “混練技術”産業技術センター (1978)
- 10) 坂本和徳, 堀越常信, 寺下敬次郎, 宮南啓: 化学工学協会第19回秋季大会要旨集, p. 560, 名古屋 (1985)
- 11) 寺下敬次郎, 南田隆, 宮南啓, 坂本和徳, 堀越常信: 第23回粉体に関する討論会要旨集 No. 25, p. 97, 名古屋 (1985)
- 12) 宮南啓, 佐藤宗武, 小森善之, 東条角治: 化学工学協会第48年会要旨集, A-106, p. 6, 京都 (1983)
- 13) 佐藤宗武, 小森善之, 宮南啓: 化学工学協会第17回秋季大会要旨集, L-212, p. 551, 仙台 (1983)
- 14) 土壌物理性測定法委員会編: “土壌物理性測定法”, 養賢堂 (1975)
- 15) 小野木重治ら: “化学計測ハンドブック”, 朝倉書店 (1974)
- 16) 大森豊明: “センサ実用便覧”, フジテクノシステム (1978)