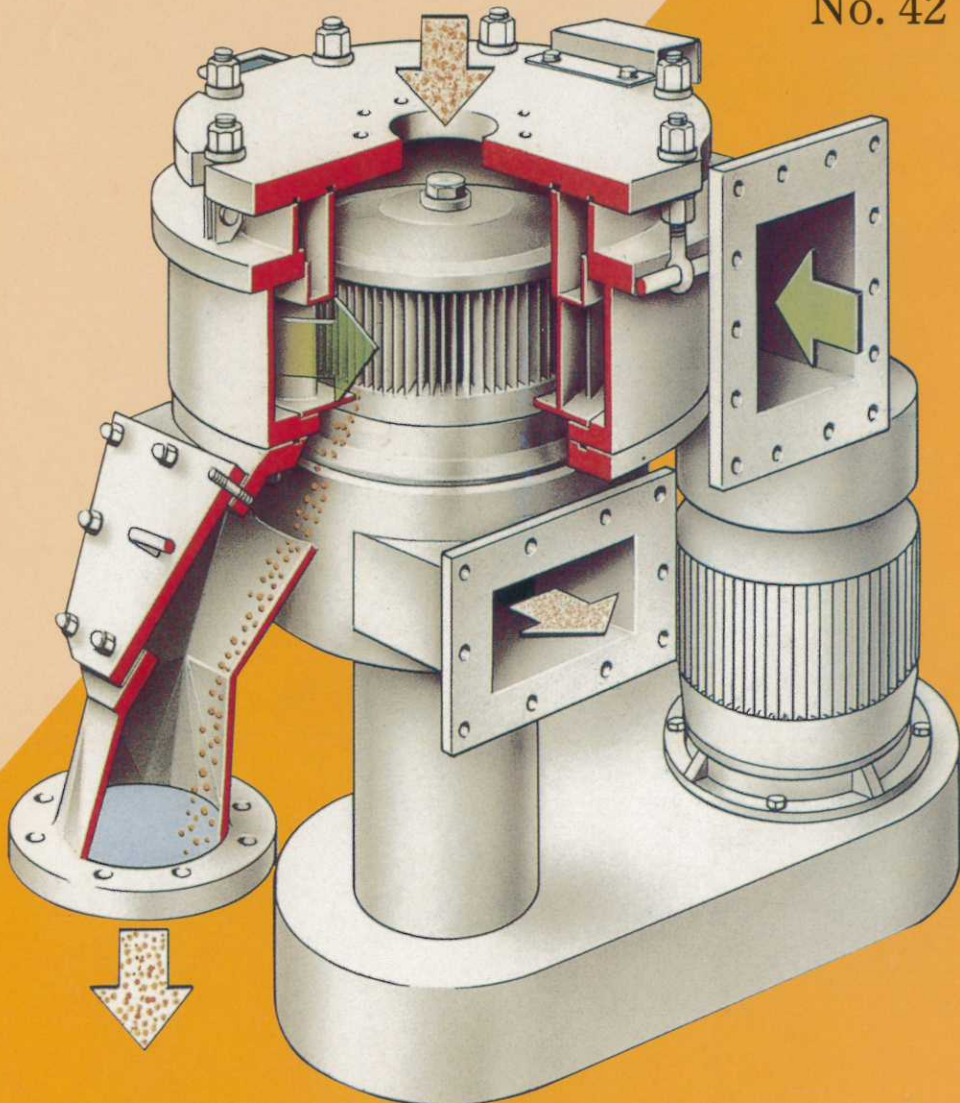


粉 碎

THE MICROMERITICS

No. 42 1998



ホソカワミクロン 株式会社
粉体工学研究所

【巻頭言】	ホソカワ粉体工学振興財団の助成事業の一面	森川 敬信	(3)
【総説】	粒子の帯電と静電付着力	創価大学 山本 英夫	(5)
	最近の粒子・流体系分離操作の動向	名古屋大学 入谷 英司	(16)
【解説】	静電微粒化法による単分散粒子の作成	同志社大学 森 康維	(25)
	廃プラスチックのリサイクルの現状および分離・選別技術	大阪府立大学 寺下敬次郎	(33)

＜特集＞ 環境保全技術と粉体工学

廃棄物管理と粉体工学	大阪府立大学 宮南 啓	(44)
メカノケミカル法を利用した都市資源からのレアケース抽出	東北大学 齋藤 文良	(54)
固気混相流と粉粒体流動の数値シミュレーション	九州工業大学 湯 晋一	(58)
粉粒体の選別・分離(粒)についてーリサイクルへの応用ー	富山大学 杉本 益規	(72)
廃棄物処理回収事例	ホソカワミクロン㈱ 山下 治壽	(84)
高温集塵を中心とする粒子分離	金沢大学 金岡千嘉男	(93)

【ニュース】	第4回 ホソカワ粉体工学シンポジウム報告	(101)
--------	----------------------	-------

【新製品紹介】	ホソカワアルピネ TSPセパレーター超微粉カット抜群のトナー専用分級機ー	(107)
---------	--------------------------------------	-------

ホソカワミクロン アグロマス AGM-SD	
ー液体原料の直接顆粒化装置ー	
ー噴霧乾燥式流動層造粒装置ー	ホソカワミクロン㈱ 研究開発部 (109)

ホソカワミクロン ダイナックス焼却システム	
	ホソカワミクロン㈱ 研究開発部 (113)

ホソカワミクロン サイクロミックス	ホソカワミクロン㈱ 研究開発部 (117)
-------------------	-----------------------

【ニュース】	ホソカワニュース	(120)
--------	----------	-------

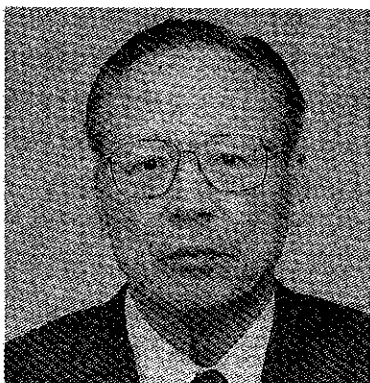
特許一言メモ

インターネットで特許情報提供 (No.162)	(15)
商標情報もインターネットで (No.163)	(24)
特許電子図書館の創設 (No.164)	(32)
国際出願は増加傾向 (No.165)	(100)
増える欧州特許出願 (No.166)	(100)
経済状況の深刻化影響か！知的財産権出願の減少(韓国) (No.167)	(108)
技術的範囲に新判定制度導入 (No.168)	(112)
低い大学の特許取得意欲？ (No.169)	(119)

【表 紙】 ホソカワアルピネ TSPセパレーター

(関連記事を107頁に掲載していますので御参照下さい)

ホソカワ粉体工学 振興財団の 助成事業の一面



森川 敬信*
Yoshinobu Morikawa

ホソカワ粉体工学振興財団の事業種目は、次のようになっている。すなわち、

1. 助成・褒賞事業：a) 研究助成，b) KONA賞，c) 学会・シンポジウム等の開催援助，d) 海外渡航費の援助，e) 研究者育成の援助，f) 出版物刊行の援助

2. 助成事業以外の事業（自主事業）：a) 粉体工学に関する講演討論会の開催，b) 粉体工学に関する英文学術誌KONAの発行である。

2.のうち、本財団主催、粉体技術談話会（会長 神保元二 名古屋大学名誉教授）の企画により実施された講演討論会およびシンポジウムにおける講演が本号に掲載されているし、今までにも掲載されてきたので、本誌の読者は本財団の2.の行事については、ご存知の人も多いと思われる。したがって、以下には1. a)の研究助成に重点をおいて記すことにする。

財団の助成事業各種目への申請受付が開始されたのは、平成4年度からである。1.のa)～f)に対する各申請数の和、すなわち申請総数は、年度によって変動がある。平成9年度には、申請総数はかなり減少したが、平成10年度には多少回復している。最も多かった申請総数を基準にすれば、その年度以外の年度の申請総数は約98%～70%の範囲にわたって変動してい

* (財)ホソカワ粉体工学振興財団 常務理事
(大阪大学名誉教授)

る。

平成9年度の申請総数がかなり減少したのは、偶発的なことなのか、あるいはなんらかの理由にもとづくものなのかはわからない。この申請総数の減少に関連して、財団が発行する年報No. 5 (1997) の巻頭言において、財団の理事である名城大学名誉教授の大塚昭信先生が、応募者を粉体工学会の会員と非会員に区分して、年度ごとに両者の申請数割合を出すことから始められ、応募に対する応募者の心理にまで言及し、貴重な考察を試みられた。

1. のa)～f)のうち、申請数が最も多いのはa)の研究助成に対する申請である。申請総数が上述のように、各年度によって異なっているにもかかわらず、各年度の研究助成申請数は、偶然にいずれも申請総数の約70%になっている。

全国を北海道地方、東北地方、関東地方、中部地方、近畿地方、中国地方、九州地方、四国地方の8地方に分けると、平成7年度～平成10年度の関東、中部、近畿の3地方からの研究助成申請数は、関東地方の平成9年度を除きふた桁で、その他の地方からの申請数に比べてはるかに多く、これら3地方からの申請数の和は、研究助成申請総数の約67%を占めている。平成9年度に限り、関東地方からの研究助成申請数はひと桁であったが、このことが平成9年度の申請総数の減少に直接に影響を及ぼしたようである。

ある。平成4年度～平成9年度の研究助成の採択率は、研究助成申請数の30%代になることが多かった。

申請者の年齢は平成10年度を例にとれば、研究助成申請者の場合、20才代：6.1%，30才代：36.4%，40才代：24.2%，50才代：33.3%である。すなわち大部分の申請者が30才代～50才代で占められている。海外渡航に対する援助申請の場合は、20才代：0%，30才代：57.1%，40才代：14.3%，50才代：28.6%となっている。

これによれば、30才代の研究者が外国で積極的に研究を発表しようとしていることがうかがえる。研究者育成に対する援助申請では、20才代：75%，30才代：25%，40才代および50才代はいずれも0で、若い世代が圧倒的に多いことを如実に示している。

研究助成に対する援助、海外渡航者に対する援助を申請される人々の研究内容は、粉体工学における広い分野にわたっている。財団の予算の関係上、申請数の中で採択される数は限定されているけれども、財団の援助を受けた研究の成果は、粉体に関連する各種分野の技術の向上に、いずれ大きく寄与することであろう。

以上のように、財団の助成事業に関して、数字にあらわれた現況の一面を記したが、読者の方々にいささかなりともご参考になれば幸いです。

粒子の帯電と静電付着力

山本 英夫* 松山 達*
Hideo Yamamoto Tatsushi Matsuyama

1. はじめに

粒子に働く付着力には大別して、液架橋力、ファンデルワールズ力、静電気力が挙げられるが、少なくとも粉体工学の教科書¹⁾レベルでは、気相中で微粒子に働く付着力については、液架橋力>ファンデルワールズ力>静電気力の順に小さくなり、静電気力は無視できる場合が多いことになっている。ところが、粒子の帯電による付着現象は粉体プロセスにおけるトラブルの元凶として忌み嫌われており、特に乾式プロセスにおいては、何か説明のつかない現象が起きると、理不尽にも「粒子の帯電」がいつも容疑者として指名手配される傾向にある。また、他方で、例えば電子写真プロセスや静電塗装プロセスなどが健全に機能していることに鑑みると、上述のことにはまだ議論の余地がありそうである。

そこで本稿では、粒子に働く静電気力の特徴について概観し、こうした問題に関連して、筆者らが最近検討を進めている「粒子の帯電」に関するいくつかのトピックスについて紹介する。

なお、ページ数の都合上、液架橋力およびファンデルワールズ力に関する解説は他書^{2, 3)}を参照されたい。

2. 静電付着力の特徴

2.1 液架橋力との対比

粒子が何故帯電するのかという話は本稿の後半にまわし、はじめに、既に帯電している粒子に働く静電気力についてその特徴を考えてみる。ここでは話を単純にするために、粒子と平板壁との付着力を考える。

液架橋力は粒子と壁面との接触点に形成される液架橋に起因する。したがって、図1に示したように、何らかの力で粒子が壁面と接触し、接触点に液架橋が形成されて初めて付着力が発生する。したがって、接触から液架橋形成までの速度論についてはよく解らないが、壁面に対する付着力にはヒステリシスおよび時間依存性があることになる。

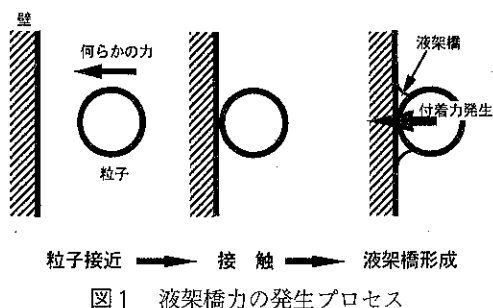


図1 液架橋力の発生プロセス

一方、帯電した粒子と導体壁面との間には、導体壁面に誘導された、粒子とは逆極性の電荷との間に引力が働く。これは図2に示したように、仮想的に置かれたいわゆる鏡像電荷と等価なので、

*創価大学工学部 生物工学科
(〒192-8577 八王子市丹木町1-236)
Tel. 0426-91-9454

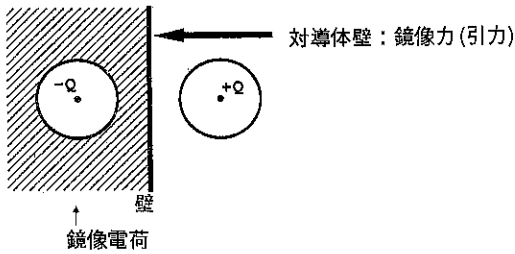


図2 帯電粒子・導体壁間に働く静電引力(鏡像力)

鏡像力と呼ばれる。この力の特徴は液架橋力と対比することで明らかとなるように、「離れていても」働く、つまり、比較的「長距離」にまで及ぶ相互作用であるという点である。壁面が絶縁性の材料で構成されている場合には、この壁面に何らかの原因で蓄積された電荷が緩和しにくいので、逆極性に帯電した粒子との間に「長距離」の引力が働く。

ところで、導体壁表面に現れる誘導電荷は、必然的に粒子電荷と逆極性となるのに対して、絶縁体壁面に蓄積される電荷は、粒子との衝突に起因して蓄積される(粒子とは)逆極性の電荷である場合が多いであろうが、何らかの理由で粒子と同一極性の場合もあるであろう。このように考えるとすぐに解るように、静電気力のもう一つの特徴は、正負逆極性であれば引力となるのに対して、同一極性の電荷同士では斥力となる点である(図3)。したがって、同じ履歴の複数の粒子が凝集するような場合の引力としては、静電気力の寄与が本質的となるようなケースは考えがたい。もち

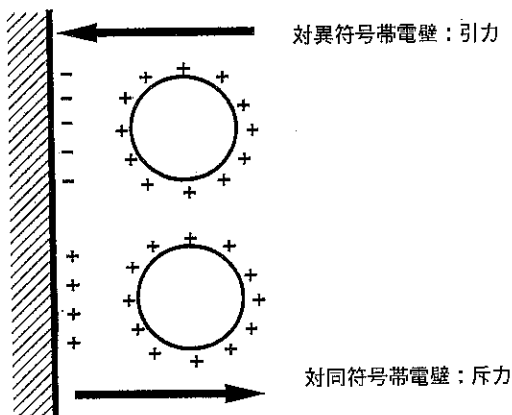


図3 静電気力は単に引力(付着力)だけではない

ろん、大きな母粒子の表面に、逆極性に帯電した微小粒子が付着する、ある種の表面改質のような場合はあり得るであろうが、こうしたケースの場合は寧ろ、壁面への粒子の付着の延長としてとらえた方が、静電気力を考える場合には考えやすいことになる(図4)。

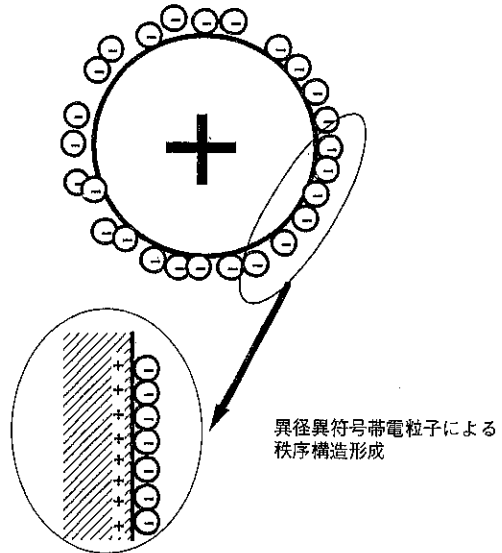


図4 静電コーティングの取り扱い

さて、壁面と帯電した粒子の間に働く静電気的な引力は長距離で作用するので、例えば、エアロゾルなどの、壁面への沈着フラックスを増大させる⁴⁾。また、帯電粒子は、外部からの電場の印加によっても、その運動を制御することができ、例えば、電気集塵技術などに応用されている。何れにせよ、このように、静電気力を考える場合は、狭義の「付着力問題」つまり、既に付着している粒子が、何らかの外力に拮抗して取れる取れないという問題としてではなく、「長距離」相互作用として、粒子の壁面へのフラックスを増加させる効果を考慮することが重要である。この点について、次項で詳しく考察してみる。

2.2 長距離作用力としての静電気力 (ファンデルワールズ力との対比)

帯電粒子の電荷量が解れば、この電荷に働く力はクーロンの法則に従うだけなので、静電気力は計算できる。厳密には、粒子の高次の誘電分極の効果を検討する必要があるなど、取り扱いが複雑

になるケースはあるが、最終的には、静電気力がクーロンの法則に従って計算される点是不会変わらない。ここでは、話を単純化するために、粒子の分極の効果は無視できるものとして、静電気力の特徴を考えてみる。

例として、表面が一様に帯電した球形粒子と導体平面との間に働く静電気力を考える。表面一様帯電球がその外側に張る電場は、対称性とガウスの法則から、全電荷が球の中心に集中して存在するときにその中心点電荷が張る電場と等価である。一方、この電場に対応して導体壁表面に誘導される電荷は、導体表面に於いては電位が一定であるという境界条件を満足するように分布するが、この電荷分布が導体の外側に形成する電場は、元の粒子の電荷の鏡像電荷が張る電場と等価である。したがって、導体壁近傍に置かれた帯電粒子に働く静電気力は、中心点電荷とその鏡像電荷の間に働く力と等しく、簡単に計算できる。

図5に示したように、粒子半径を R 、粒子表面と導体壁との距離を z とし、粒子の帯電量を q とすると、粒子の中心電荷と鏡像電荷との距離は、 $2z+2R$ で与えられるから、静電気力 F_e は、引力を正として、クーロンの法則により、次式で与えられる。

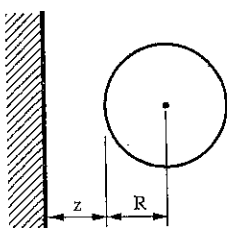
$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \times \frac{q^2}{4(R+z)^2} \quad (1)$$

クーロンの法則は、良く知られているように、「逆二乗」則であるが、このように粒子と壁面の距離を、粒子の表面と壁面の距離 z で測る場合には、静電気力の距離依存性には少し注意する必要がある。つまり、 $z \gg R$ では確かに、

$$F_e \sim z^{-2} \quad (2)$$

となるが、一方、 $z \ll R$ では、

$$F_e \sim z^0 \quad (3)$$



$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \times \frac{q^2}{4(R+z)^2}$$

$$F_v = \frac{H}{6} \times \frac{4R^3}{(2R+z)^2 z^2}$$

図5 粒子表面と壁面距離を考慮に入れた静電気力とファンデルワールズ力

となって、即ち、静電気力は、距離 z に依らない。これは、帯電粒子と導体壁の間に働く静電気力は、接触距離(contact gap)が粒子半径程度までは、距離の増加に対して急激に減少することがないことを意味している。

次に、これを、静電気力と同じように、一応、遠隔作用力と考えられるファンデルワールズ力と比較してみる⁵⁾。上と同じ設定(図5)で、ファンデルワールズ力 F_v を計算すると次式で表される。

$$F_v = \frac{H}{6} \times \frac{4R^3}{(2R+z)^2 z^2} \quad (4)$$

この力は粒子表面と壁面の間の距離 z に対して、

$z \ll R$ の時、

$$F_v \sim z^{-2} \quad (5)$$

で減少する。これは、これまで見てきた静電気量の場合と違って、距離の二乗に反比例している。

$z \gg R$ の条件では、

$$F_v \sim z^{-4} \quad (6)$$

で、急激に減少する。これらの計算は、いわゆる遅延効果は無視した計算なので、距離が大きい時には F_v はもっと小さく考えられている。したがって、ともに遠隔作用力ではあるが、ファンデルワールズ力は「近距離」作用力であり、そ

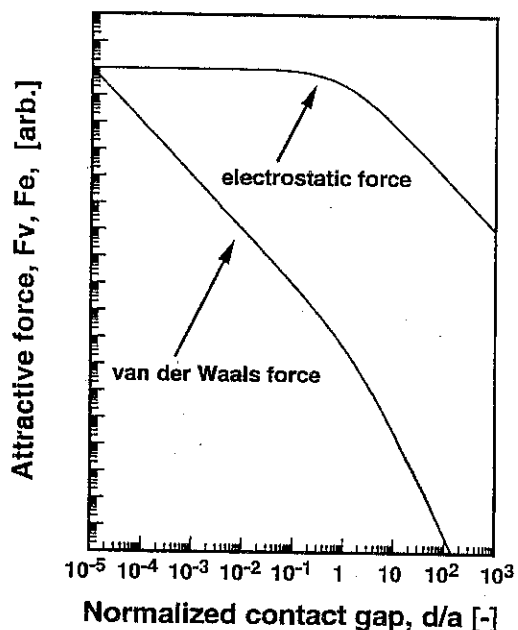


図6 静電気力とファンデルワールズ力の距離依存性の比較

以上から、粒子が壁面から離れているときに作用する力としては、ほとんどの場合、静電気力だけを考えれば良いことになることが解る。

2.3 粒子分極電荷の影響

前項までの議論では、簡単のために、静電気力の計算には粒子の分極の効果を考慮しなかった、しかし実際には、導体壁近傍に帯電粒子を置いたとき、誘電体粒子は、その鏡像電荷の張る電場によって分極する。粒子の分極が生じれば、この分極電荷が粒子の外側に形成する電場に対応して、導体壁上に新たに誘導電荷を生じるが、これによって形成される電場も粒子の分極電荷の鏡像と考えれば、鏡像が張る電場と等価になる(図7)。こうして形成された分極電荷の鏡像が形成する電場は、粒子にさらに分極を引き起こすので、粒子・導体壁周りに形成される電場は、これら全て、つまり、粒子の高次分極とそれらの鏡像の形成する電場を全て重ね合わせることで最終的に得られることになる。筆者らは最近、帯電粒子と導体壁との間に働く静電気力を厳密に取り扱うことを目指して、この問題を検討している^{6,7)}。以下に、得られた結果の一例を紹介する。

図8は粒子の高次分極を考慮して静電気力を計算した結果である。粒子の比誘電率をパラメータとし、 $1 < \epsilon < 20$ の範囲で静電気力を、粒子・導体壁間距離の関数として計算している。粒子・導体壁間距離 d は粒子半径 a を用いて規格化されている。また、静電付着力 F_e は、分極が生じない場合($\epsilon = 1$)の粒子が導体壁に接触したときに生ずる付着力 $F^0 = q^2 / 4\pi\epsilon_0(2a)^2$ で規格化されている。粒子・導体間距離が粒子半径よりも小さくなるあたりから、高次の分極の効果が現れ始める様子が分かる。つまり、粒子が粒子半径程度以上壁から離れていれば、分極の効果はほぼ無視できるのに対して、粒子が接触している場合の静電気的付着力は、粒子の比誘電率によっては、通常用いられている値よりも相当大きな値になりうる可能性があることが分かる。

次に、いくつかの粒子径について静電気力とファンデルワールズ力を比較してみたのが図9である。静電気力の計算(式(1))には、帯電粒子の電荷の値($q = 4\pi R^2\sigma$)として、このような

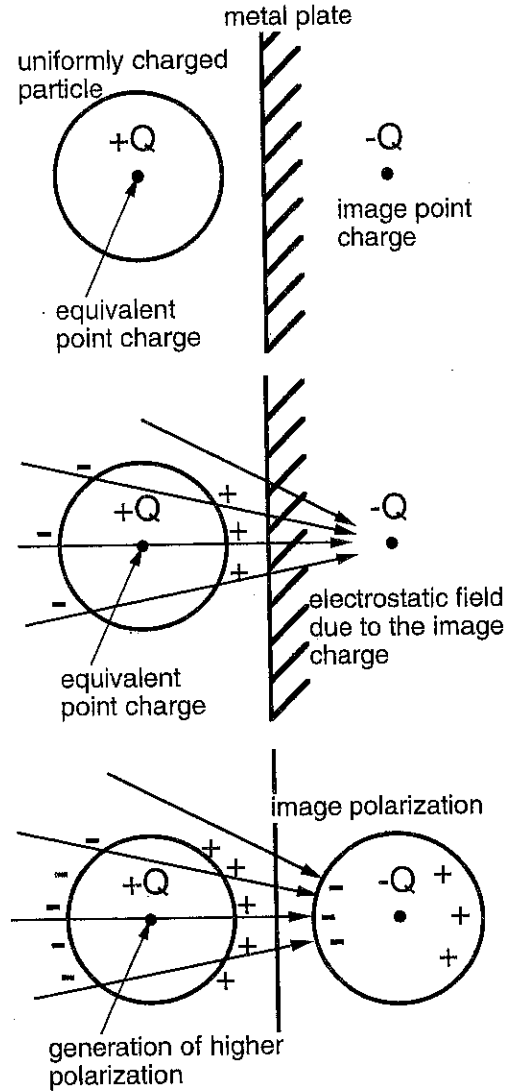


図7 粒子の高次分極の概念図

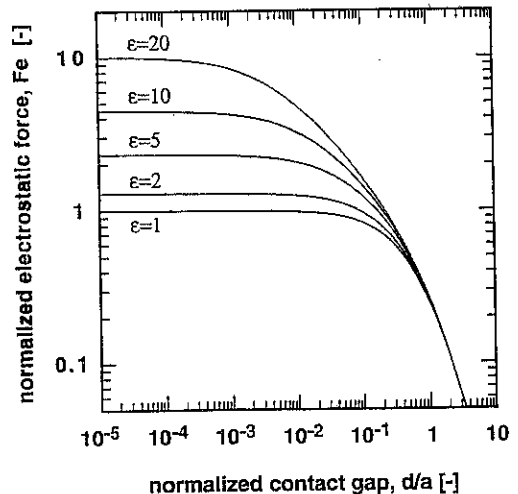


図8 粒子の高次分極効果を考慮した静電気力の計算結果

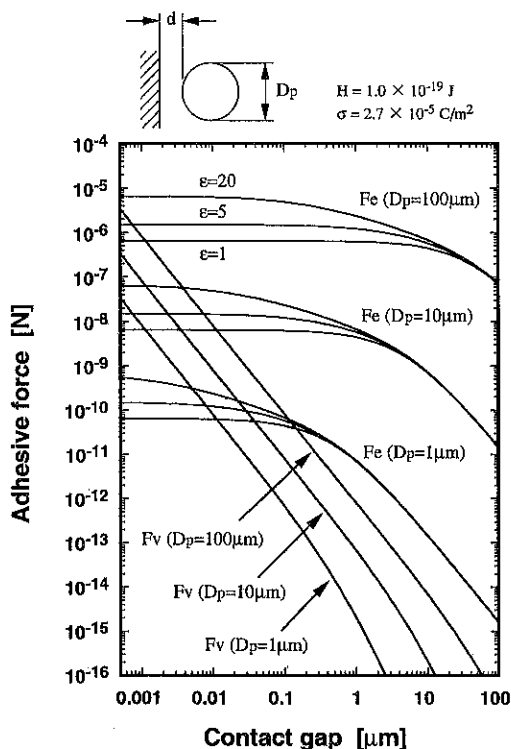


図9 静電気力とファンデルワールズ力の比較
比較の際によく用いられる表面電荷密度の値である $\sigma = 2.7 \times 10^{-5} \text{ C/m}^2$ を用いた。また、ファンデルワールズ力の計算 (式 (4)) には、ハマーカー定数として、これも最もポピュラーに用いられている値である $H = 1.0 \times 10^{-19} \text{ J}$ を用いた。前にも述べたように、静電気力は粒子サイズ程度のスケールで働く比較的マクロな相互作用であって、実際、それぞれの粒子のサイズに応じて粒子半径程度までその効果が接続している様子が見て取れる。粒子の高次分極の効果は、通常の高分子材料の比誘電率の範囲では、せいぜいオーダーで働く程度の大きさである。また、接触・付着した場合 (ギャップ 1 nm 程度) の付着力としては、やはり通常言われている通り、10 μm 程度の粒子からファンデルワールズ力が支配的になっている様子が観られる。しかし、少しでも壁から距離を置くと静電気力が支配的になることも解る。

3. 粒子の接触帯電機構

これまで概観してきたように、粒子帯電量さえ与えられれば、粒子に働く静電気力を見積もることは、いくつかの留保は置くとしても、可能であ

ると考えてよい。問題は、粒子の帯電量を予測する部分にある。しかし、壁面との接触または衝突による粒子帯電量を任意・一般的な操作条件下で予測することは、現在までのところ、残念ながら可能とはなっていない。そこで、本節では、これまでに議論されてきた、粒子の接触 (衝突) 帯電の機構について概観する。

3.1 コンデンサーモデル

二つの物体が接触したとき、電荷の移動が生じていわゆる静電気が発生することは古くから知られている。接触による電荷の移動は金属同士の接触でも起こる。ただし、金属は導体体なので、接触面分離の際に電荷が完全に緩和してしまい、「静電気」として観測されないだけである。金属同士の接触の場合は、表面の電子のエネルギー状態の差に起因するいわゆる接触電位差が電荷移動の駆動力となる点については、議論が確立していると考えてよい⁸⁾。実際には、電荷が移動した結果として接触電位差が発生するのであるが、等価回路的には、接触表面電位差 V_c の電池を接続したコンデンサーの極板と見なすと考えやすい (図10)。これは一般にコンデンサーモデルと呼ばれている。

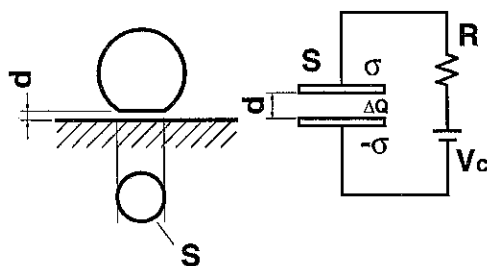


図10 コンデンサーモデル

絶縁性物質の電荷移動機構に関する研究も、これまでも広く行われてきたが、何らかの物性値から直接的に移動電荷量を予測できる段階までは進んでいない。長くなるので、この問題についての詳細なレビューは省略することにし、ここでは、L. B. Scheinのグループの考え方のみを紹介する。

Scheinのグループは、トナー等、絶縁性粉体のブローオフ帯電量の濃度依存性のデータから、絶縁性粒子の帯電においても、電荷移動を "high

density limit”に基づいて考えてもよいとしている⁹⁾。これは、「絶縁性物質表面の電子状態密度が充分高い」という意味で、もっと簡単な言い方をすれば、「絶縁体の接触帯電を、金属-金属接触の電荷移動機構と同じに取り扱っても良い」とする主張である。つまり、図11に示したように、金属の場合は、接触電位差 V_c を金属の仕事関数(W_1, W_2)の差で表現できる($V_c = (W_1 - W_2)/e$)のに対して、絶縁体にも有効仕事関数 W_p を定義して、金属-絶縁体間の接触電位差も $V_c = (W_m - W_p)/e$ として、電荷移動機構をコンデンサーモデルで取り扱うことができることになる。これまで、絶縁体の接触帯電に関する研究論文のほとんどが、この有効仕事関数という概念のもとに議論されており、絶縁性粒子の接触電位差測定装置なるものも開発され市販されている。筆者らの接触帯電に関する最初の論文¹⁰⁾でもこの考え方を基礎に議論を進めた。しかしながら、Sheinらも認めているように¹¹⁾、一般の絶縁性粒子で観測される帯電量は、コンデンサーモデルの

予測からはオーダーで小さくなってしまう。

例として、接触電位差 V_c を小さく見積もって0.1[V]とし、接触ギャップ d を大きく見積もって1[nm]としてコンデンサー電極間の電荷密度 $\sigma (= \epsilon_0 \epsilon_d V_c / d; \epsilon_d$ は気体の比誘電率でここでは1とする)は、 $\sim 10^{-3} [C/m^2]$ となり、通常観測される帯電粒子の表面電荷密度($\sim 10^{-4} [C/m^2]$)よりオーダーで大きくなってしまう。コンデンサーモデルは接触しているときのモデルであり、その時の電荷密度は、確かに $\sim 10^{-3} [C/m^2]$ のオーダーであるかも知れないが、分離過程で $\sim 10^{-4} [C/m^2]$ のオーダーに緩和してしまうのかも知れない。ここに、一つの論点がある、

3.2 1個粒子の衝突帯電実験

筆者らは、図12のような実験システムを用いて高分子の球形粒子を1個ずつ金属板に衝突させて、一回の衝突(接触)で移動する電荷量を測定する実験を行ってきた。空気銃で打ち出された粒子は二重円筒型ファラデーケージを通過して金属板に衝突する。衝突前の粒子が持っている電荷は二重円筒型ファラデーケージから得られる波形の

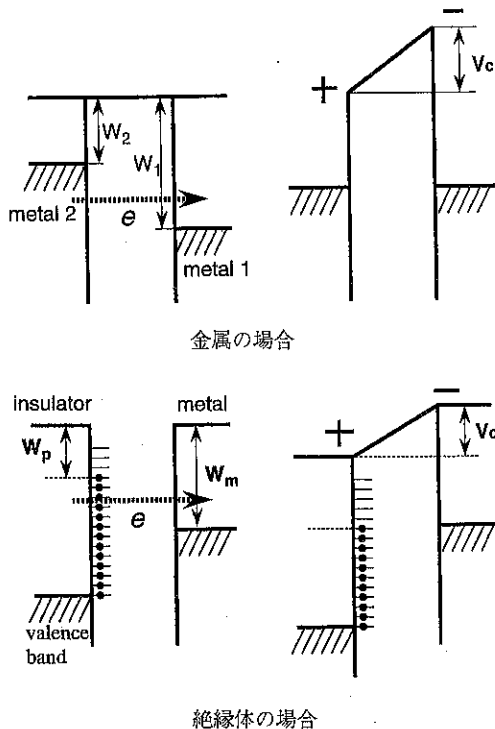


図11 “High density limit” の考え方に依る絶縁体の接触電位差(もしくは有効仕事関数)の概念

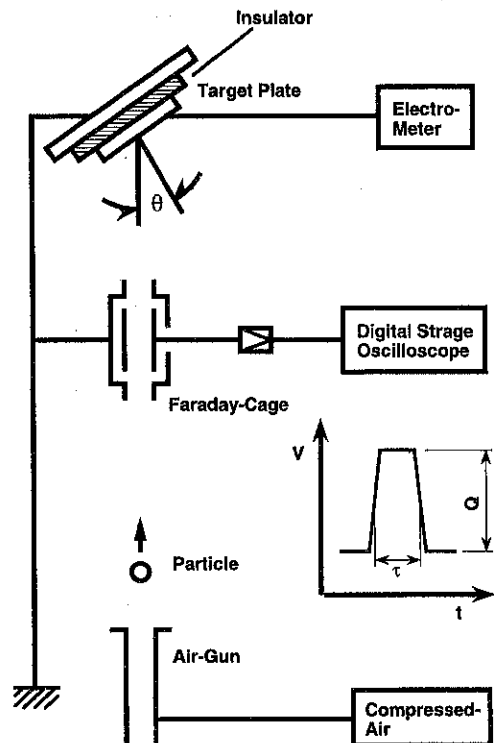


図12 衝突帯電実験装置の概念図

高さから計算できる。衝突直前の速度はこの波形の幅で計算される。また、金属板に衝突・分離で粒子が新たに得る電荷量は金属板に残された電荷の逆符号としてエレクトロメータで観測される。この実験から得られた結果の一例¹²⁾を図13に示した。横軸は初期帯電量（すなわち、衝突前に粒子に与えられていた電荷量）、縦軸は衝突帯電量（一回の衝突で粒子に新たに与えられた電荷量）である。図から解るように、衝突帯電量は、粒子の初期帯電量に対して直線的に依存している。この結果は、前述の“high density limit”とするモデル、あるいはコンデンサーモデルと大変相性がよい。つまり、接触時とは、コンデンサー回路が閉じた状態に対応し、コンデンサーは速やかに飽和電荷まで充電されると考えると、初期帯電量は回路が閉じる前にコンデンサー極板が既に持っていた電荷に対応する。したがって、衝突帯電量は、この初期帯電量と飽和帯電量の差し引きに対応すると考えることができる。もう少し詳しく言うと、この結果は、絶縁性物質の表面電子状態密度が充分に高い（“high density limit”）か、または一様に分布していることに対応していると考えて良い、ということに対応している。

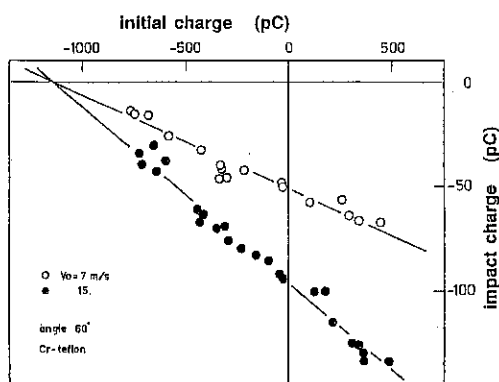


図13 衝突帯電実験結果の一例

ところが、図12のシステムを用いた実験結果の詳細な検討結果は、上のような考え方を支持するものではなかった。衝突帯電量（ ΔQ ）が初期帯電量（ Q_i ）と飽和帯電量（ CV_c ）の差し引きに対応すると考えると、

$$\Delta Q = CV_c - Q_i \quad (7)$$

となる。Cはコンデンサーの容量である。図13の

横軸切片の初期帯電量（ $\Delta Q = 0$ ）の値を平衡帯電量（ Q_e ）と称するが、この値は式(7)より、

$$Q_e (= Q_i) = CV_c = C(W_m - W_p) \quad (8)$$

となり、同じ絶縁体粒子でも、衝突する金属によって変わる（金属の仕事関数に比例する）のである。しかし、実験結果は、図14に示すように、金属の仕事関数には依存しなかった。この結果は、接触している状態では、充電電荷量はコンデンサーモデルに従って金属の仕事関数に依存するにせよ、分離後の電荷（観測される粒子帯電量）は仕事関数（別な言い方をすれば、接触電位差）には依存せず、むしろ粒子側の物性に依存していることを示唆している。

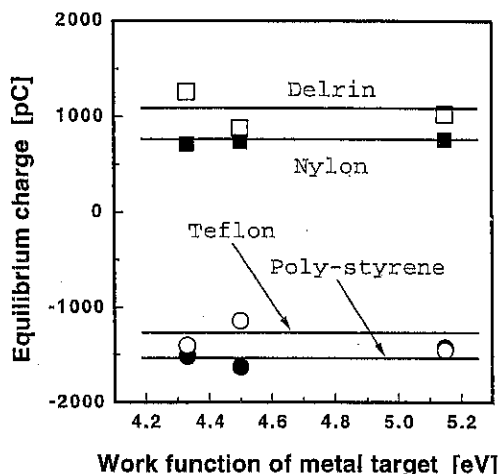


図14 粒子の平衡帯電量の(金属の仕事関数依存性

3.3 電荷緩和モデル^{13,14)}

一般に、2つの物体の接触・分離に伴う電荷の発生は、図15に示したようなスキームに従う。まず、2つの物体が接触する。接触面では、何らかの電荷移動機構に従って、電荷が移動し、電荷二重層が形成される。接触面が分離する際、この電荷が両表面に固定されたままで（電荷緩和せず）分離し、接触帯電電荷として観測される、とするのがコンデンサーモデルの骨子である。ところで、分離時に、電荷二重層が引き離されていくとき、次式で示されるとおり、距離dの増加にともなって「極板」間の静電容量が減少し、したがって、表面電位差が急激に増加していくと考えられる。

$$V = \sigma / (\epsilon_0 \epsilon_d / d) \quad (9)$$

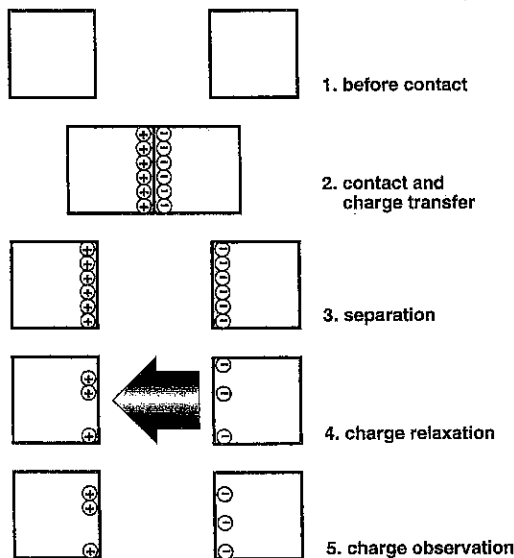


図15 接触帯電プロセスの概念図

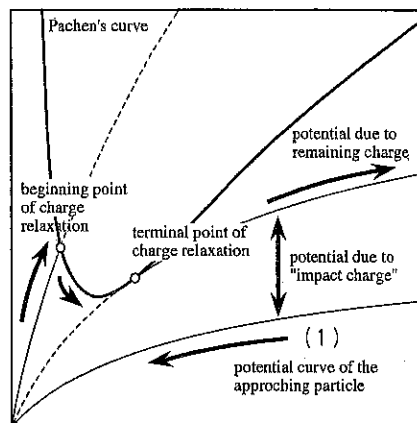
この電位差は非常に大きくなって、やがて空气の絶縁限界を充分に超えてしまうことであろう。ちなみに、接触時の電荷密度が、 $\sim 10^{-3} [\text{C}/\text{m}^2]$ (前述のスキーム) であると、極板間が $100 \mu\text{m}$ になると電位差は 10kV となり、電界強度は $1000\text{kV}/\text{cm}$ となり、空气の絶縁限界 (一般に $30\text{kV}/\text{cm}$ といわれている) を遙かに越えてしまう。したがって、接触表面が引き離されていく途中で、帯電電荷は気中放電によって緩和してしまい、最終的に観測される接触帯電量とは、実は、この緩和の残留電荷であると考えることができる。筆者らは、この、接触帯電量決定モデルを電荷緩和モデルと称している。

筆者らが提案した電荷緩和モデルの概念図を図16に示した。表面間の放電限界電圧としては、良く知られているパッシェンの法則を利用することができる。これは、次式で示すように、放電限界電圧を、対向する極板の距離 d の関数として与える。

$$V_s = V_{s\min} \times \frac{(pd)/(pd)_{\min}}{\log[e(p d)/(p d)_{\min}]} \quad (10)$$

P は気相の圧力であり、 $(pd)_{\min}$ は最少放電限界電圧 $V_{\min}$ を与える条件である。 $V_{\min}$ と $(pd)_{\min}$ は極板間に存在する気体の種類に依存するので、放電限界曲線は図17に示すように、ガス種によって異なる。いま、適当な初期帯電量を持つ粒子が衝突相手の金属板に近づいていくと、極板間電位

Paschen's break down potential, V_s or potential of the particle surface, $V_i + V_p$



Contact gap, d

図16 電荷緩和モデルの概念図

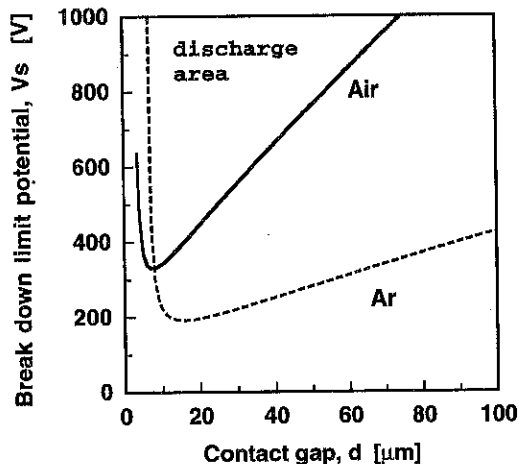


図17 空气中とアルゴンガス中でのパッシェンカーブ (限界放電曲線) の違い

差は (粒子の誘電分極を考慮すると) 図13の曲線(1)のように変化する。これを粒子の表面電位曲線と呼ぶ。やがて、粒子は金属板に接触し、接触面で電荷の移動が生ずる。この電荷をもらった粒子はリバウンドに伴って離れていくが、この時、粒子の持っている電荷量は衝突前の電荷 (初期帯電量) より増加しているので、粒子が離れていくときの電位曲線は、接近する時のそれより上になる。この電位曲線がパッシェンカーブと交わる場合は、交わった時点から放電緩和が始まり、粒子表面は電荷を失いつつ、金属板から離れていく。やがて、粒子の表面電位曲線がパッシェンカーブの下を離れるときの電荷が、最終的に粒子に残留し、これと初期帯電量との差し引きが衝突帯電量として観測されることになる。差し引きがゼロ、

すなわち、帯電粒子が金属板に接近するときの粒子表面電位曲線がパッシェンカーブに接するときの初期電荷量が図13で観測される平衡帯電量(Q_e :横軸の切片の値)ということになる。

このモデルは、筆者らの実験結果をよく説明する。図18の実線は、粒子の誘電率を変数にしてこのモデルで計算した平衡帯電量(Q_e)である。図には空気中とアルゴン中での実験値を載せてあるが、理論曲線は実験値と良く一致している。

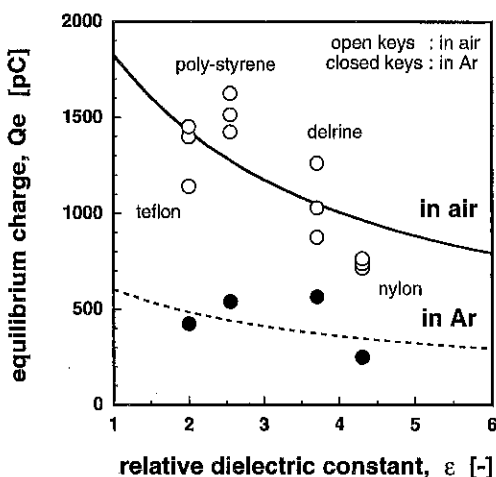


図18 平衡帯電量の粒子誘電率依存性 (空気中およびアルゴンガス中)

また、このモデルからは、衝突帯電量が粒子の初期帯電量に対して直線的に依存することも導かれる。前述したように、この「直線依存性」は、コンデンサーモデル (あるいは「high density limit」) と大変相性が良いわけであるが、これが実は単なる現象論的な一致に過ぎないのかも知れないことを示唆している点で重要である。電荷緩和モデルの特徴は、非経験的に (つまりフィッティングパラメータなしで) 実験結果を良く説明する点にあり、まだいくつかの解決すべき課題は残されているが、有望なモデルであると筆者らは考えている。

3.4 粒子の最大帯電量

上記「電荷緩和モデル」によれば、粒子表面電位曲線がパッシェンカーブに接する時の粒子の帯電量が、衝突 (接触) 帯電現象において粒子に与えられる最大帯電量ということになる。図19に、

こうして求めた粒子最大帯電量を粒子径の関数として示した。計算結果と衝突帯電実験から得られたデータは数は少ないが良く一致している。

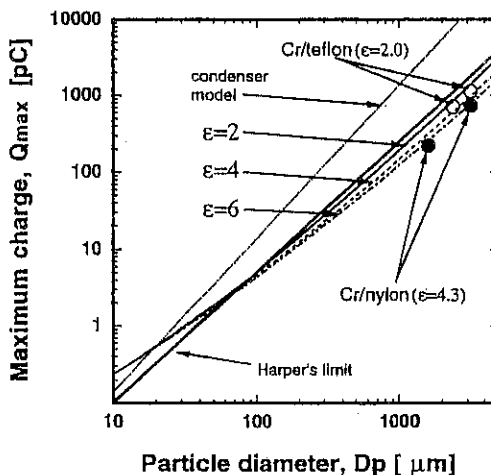


図19 粒子の最大帯電量 (図中の○, ●は実験値)

図中には、参考のために、コンデンサーモデルから、接触電位差0.1V、トンネル緩和の限界距離1nm (これらは十分に控えめな値であることに留意) を仮定して求めた、粒子帯電量を示した。コンデンサーモデルがほとんど全ての領域にわたって過大な帯電量を予測することが見て取れる。

一方、そうすると、気中での放電限界を考慮するとすれば、空気中に保持された粒子が、最大でどのくらいの電荷を保持しうるかということが興味の対象となる。増田らは、こうした観点から粒子に働く最大静電気力とファンデルワールズ力の関係を議論している¹⁵⁾。この議論の中には一部論拠不明の部分もあるが、結論は興味深いようである。この論文でも引用されているが、中島らのグループは、帯電した液滴を空気中に保持しながらその比電荷を計測することで、空気中で粒子が保持し得る最大帯電量を調べている^{16,17)}。この方法に依れば、蒸発に伴って液滴径が減少することを利用して、大きな粒子比電荷を実現し得る点が興味深いところである。この実験では、液滴は、蒸発に伴って比電荷が増加していき、レイリー限界¹⁸⁾に達して分裂することで電荷を失うか、あるいは、気中放電限界に達して、放電に因って電荷を

失うかする。放電限界に関しては、議論の余地は残るようではある¹⁹⁾が、ここでは、いわゆるハーパー限界²⁰⁾（または、Schaffersの経験式²¹⁾とも言う）との関係が検討されている。詳しくは文献[16]などを参照していただきたいが、このハーパー限界は次のような前提で粒子の最大帯電量を与えるものである。すなわち、帯電した微小粒子の表面では、径が小さいために表面電場が（平板表面などに比べると同じ表面電荷密度でも）極めて強くなるが、この強電場の集中領域は粒子表面近傍の微小な空間に限られる。このため、通常良く採用されている空気の絶縁破壊電界強度30kV/cmよりもかなり高い電場に達するまで粒子表面からの放電は起こらず、粒子の保持しうる最大表面電荷密度は、この30kV/cmから見積もられる値よりもかなり大きくなる。

参考のために、このハーパー限界から求めた粒子最大帯電量を、図19の中に示した。図から解かるように、ハーパー限界は、筆者らが電荷緩和モデルから求めた最大電荷量と良く一致している。両者ともに、粒子表面での気中放電限界を考慮して求められた限界値ではあるのだが、出発点となるべき放電限界の考え方に違いがあるので、本来は一概には比較できるものではない。であるにもかかわらず、このように良く一致していることには何か意味が隠されているのかも知れず、今後詳しく検討していきたいと考えている。

4. おわりに

本稿の前半では、静電付着力の特徴を、液架橋力とファンデルワールズ力と比較しながら概説してきた。その特徴をまとめると、第1は、液架橋力のように接触して初めて付着力が発生するのではなく、遠隔作用力であり、その意味では付着現象を誘起する作用力である。第2は、同じ遠隔作用力であるファンデルワールズ力が「近距離」作用力であるのに対して、静電気力は粒子の半径程度の距離まで減衰せずに作用する「遠距離」作用力である。第3は、粒子の持っている帯電量が解れば、クーロンの法則に従って、比較的簡単に計算ができる。そこで、絶縁体粒子の高次の分極の効果を考慮して静電付着力を計算し、粒

子の比誘電率が $1 < \epsilon < 20$ ではオーダー程度の違いがあることを示した。

後半では、粒子帯電量を予測するための粒子帯電機構のモデルについて概説した。特に、従来から多くの論文の議論の根拠となっているコンデンサーモデルでは接触・分離プロセスによる粒子の帯電量は予測できないことを示した。つまり、コンデンサーモデルが与える電荷量は、接触状態における接触面に形成された電荷二重層の電荷量を予測するものであって、分離後の粒子に残る電荷（観測帯電量）を予測するものではないことを示した。

これに変わるものとして、筆者らが提案している「電荷緩和モデル」について紹介した。このモデルの骨子は、粒子の接触・分離後に観測される帯電量は、分離時の放電緩和過程で残留した電荷であり、この残留電荷量を決める要因は粒子の有効仕事関数（あるいは接触電位差）ではなく、絶縁体粒子の誘電率である、という点である。これは、筆者らの帯電実験結果と良く一致した。

しかし、本文では触れなかったが、図19からも見て取ることができるが、筆者らの衝突帯電実験では、直径1～3mm程度の比較的大きな高分子粒子を用いて実験を行ってきた。したがって、この実験結果が、通常の粉体粒子サイズにもそのまま適用可能なのかどうか、また、どの程度の粒子径まで、電荷緩和モデルが適用可能なのかを詳細に検討することは、今後の重要な課題である。この衝突帯電実験における適用サイズの制約は、いくつかの実験遂行上の制約、特に、一個粒子の帯電量計測の感度の問題に起因する。

ところで、本稿の始めの議論に戻って見ると、元々、粒子帯電量を計測したいのは、粒子に働く静電気力を知りたいからなのであった。ここに発想の逆転がありそうである。つまり、一個粒子の付着力を、ある程度の長距離まで、粒子と壁面との距離を厳密に制御、あるいは計測しながら測定することができるような装置を構築して、粒子付着力が実測できれば、粒子の接触帯電量を求めることが（逆に）可能となるであろう。検討を始めたところである。

引用文献

- 1) (社)日本粉体工業技術協会編：「粉体工学概論」，粉体工学情報センター（1995）
- 2) 粉体工学会編：「粉体工学便覧」，日刊工業新聞社（1998）
- 3) 粉体工学の基礎編集委員会編：「粉体工学の基礎」，日刊工業新聞社（1992）
- 4) 例えば，静電気学会誌，12（1997）250の解説などを参照されたい。
- 5) 例えば，J. Israelachvili, "Intermolecular and surface forces"（「分子間力と表面力」：近藤保他訳（1991，マグロウヒル）
- 6) 松山，山本，粉体工学会誌，34（1997）154
- 7) 松山，山本，第35回粉体に関する討論会講演要旨集，（1997：東京）213（一部に計算間違いがありますので御注意下さい。詳細は筆者まで）
- 8) 例えば，J. Lowell, J. Phys. D: Appl. Phys., 34（1975）53
- 9) 例えば，G. S. P. Castle and L. B. Schein, J. Electrostat., 36（1995）165
- 10) H. Yamamoto and B. Scarlett, Part. Charact. 3（1986）117
- 11) L. B. Schein, et al., J. Appl. Phys., 69（1991）6817
- 12) 松山，山本，粉体工学会誌，24（1987）765
- 13) T. Matsuyama and H. Yamamoto, J. Phys. D: Appl. Phys., 28（1995）2418
- 14) T. Matsuyama and H. Yamamoto, J. Phys. D: Appl. Phys., 30（1997）2170
- 15) 増田，松坂，粉体工学会誌，30（1993）713
- 16) 濱本，中島，佐藤，静電気学会誌，15（1991）452
- 17) 中島，佐藤，静電気学会講演論文集 '96（1996：東京）81
- 18) Lord Rayleigh, Phil. Mag., 14（1882）184
- 19) 中島，私信
- 20) W. R. Happer, "Contact and Frictional Electrification", Oxford Univ. Press,（1967：London）14，または，静電気ハンドブック（静電気学会編，オーム社，1981）p. 88の式（4.5）を参照されたい。説明は，文献[16]の記述が最も丁寧。
- 21) 粉体工学便覧（粉体工学会編，日刊工業新聞社，1986）p. 231にあるSchafferの経験式（Schaffersの誤りと思われる）は，数値が間違っているようである。

特許一言メモ No.162

インターネットで特許情報提供

特許庁は今年4月より，インターネットのホームページで約200万件の特許情報の提供を始めた。企業や大学の研究開発に役立て，ベンチャー企業の事業化を促す。公開するのは1993年以降に発行された特許情報。特許庁のホームページにアクセスし，出願人や発明の名称，公開日で検索す

る。英文検索もできる。商標も7月からインターネットで公開する。

ホームページのアドレスは

<http://WWW.jpo-miti.go.jp/> です。

（朝日 10.4.18より）

最近の粒子・流体系分離操作の動向

Recent Trend on Particle-Fluid Separation

入谷 英司* 向井 康人*

Eiji Iritani Yasuhito Mukai

1. はじめに

濾過、圧搾、沈降、遠心分離等の機械的な操作による粒子・流体系分離は、シンプルな操作であるとともに、最も省エネルギー的であり、また環境への二次汚染がないクリーンな技術として、現在改めてその利点がクローズアップされつつあり、高性能化への期待が高まっている。すなわち、先端技術産業や環境保全における最近の高度分離の要求とともに、これまで対象としてきた粒子よりも、より微細な超微粒子などを取り扱うようになり、さらにはタンパク質のような生体高分子、ゲル、エマルションやマイクロエマルションをも対象とするようになっており、分離特性や挙動をよりミクロな観点から捉える必要性が生じている。

このような背景を考慮しつつ、本稿では、機械的な粒子・流体系分離操作の中から、主として濾過および沈降操作を採り上げ、最近の動向について述べる。

2. 分離特性を支配する因子

粒子・流体系分離操作における分離特性を支配する最も大きな因子は分離対象物の粒子のサイズであることはいうまでもなく、これについては古くから多くの研究が行われている。ここでは、分

離特性に影響を及ぼす主因子の一つである粒子の荷電状態について主として述べる。

一般に微粒子は懸濁液中で荷電を帯びているのが普通である。たとえば、金属酸化物は等電点を持ち、懸濁液のpHに応じて種々の荷電状態をとる。したがって、この微粒子懸濁液を濾過すると、その溶液環境の影響を大きく受ける。たとえば、ルチル型のTiO₂の ζ 電位を顕微鏡電気泳動装置を用いて測定すると、pH 8付近で等電点をもち、このpHより酸性側で正、またアルカリ性側で負の電荷をもつ両性酸化物であることがわかる。

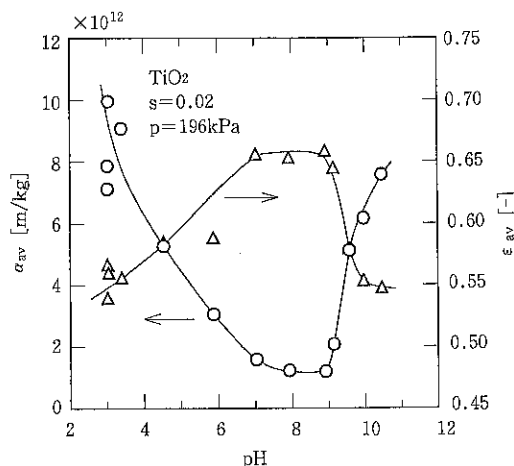


Fig.1 TiO₂懸濁液の精密濾過におけるケーキの平均濾過抵抗と空隙率

Fig.1には、質量分率 $s = 0.02$ のTiO₂ (1次粒子径 $0.47 \mu\text{m}$) の微粒子懸濁液を $p = 196\text{kPa}$ の定圧下で精密濾過して得た濾過ケーキの平均濾過

*名古屋大学大学院工学研究科分子化学工学専攻
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)
Tel. (052) 789-3374 Fax. (052) 789-3375

比抵抗 α_{av} と平均空隙率 ϵ_{av} を pH に対してプロットした¹⁾。 α_{av} は濾過速度の大ききの指標となり、 α_{av} が小さいほど濾過速度が大きくなる。 pH 8 付近で α_{av} は最も小さくなり、極小値を持つ曲線となる。一方、 ϵ_{av} は等電点付近で極大値を持つ曲線となり、等電点より離れるにつれ ϵ_{av} は小さくなり低含水率のケーキが形成される。等電点付近では粒子間に静電的反発力が働かないので、ファンデル・ワールス引力により粒子は凝集し、粗大化する。ある粒子が他の粒子と接触して凝集すると、その粒子はその接触点に固定されるため、一般に凝集粒子は空隙の大きな緩い構造となる。したがって、こうした凝集粒子から形成される濾過ケーキも、その空隙率は大きくなると考えられ、その結果ケーキ内を流れる液の抵抗は小さくなり、 α_{av} は小さくなる。また、TiO₂ を水・エタノール混合溶媒中に懸濁させた試料を用いて精密濾過を行うと、エタノール分率の増大とともに、 α_{av} は小さく、一方 ϵ_{av} は大きくなった²⁾。これは、エタノール分率の増大につれ電位が減少するとともに溶媒の誘電率も減少するため、静電的反発力が小さくなり、大きな空隙をもつ凝集体が形成されやすくなるためである。

次に、金属酸化物と同様に等電点をもつタンパク質の牛血清アルブミン (BSA, MW67,000) 溶液を限外濾過した場合には、Fig. 2 のように等電点の pH 5 付近で α_{av} は最大となり、TiO₂ 懸濁液の場合とは逆の傾向を示した³⁾。一方、 ϵ_{av} は

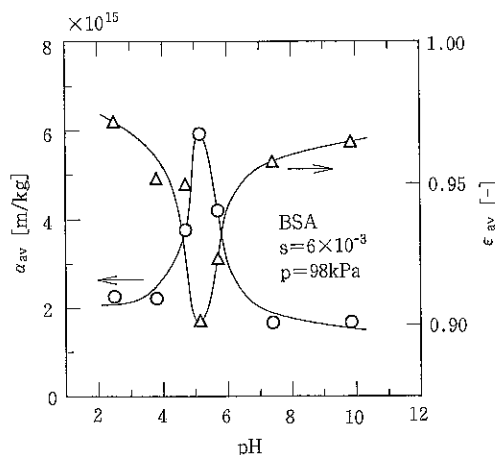


Fig.2 BSA溶液の限外濾過におけるケーキの平均濾過比抵抗と空隙率

等電点付近で最小となり、これもTiO₂懸濁液の傾向とは逆である。タンパク質の場合にも、等電点では静電的反発力は働かず分子同志がファンデルワールス引力により接近するという状況は微粒子の場合と同様であるが、凝集は起こらない。これはタンパク質が親水コロイドであり、表面の水和層がタンパク質分子を包んで保護し、その立体障害的作用によりタンパク質が分散安定化しているためである。したがって、多量の電解質やアルコールを加えてこの水和層をはがすと、タンパク質はたちまち凝集し塩析現象が生じる。このように、等電点においてもタンパク質は分散しており、しかも静電的反発力が働かないので、ケーキは密な構造をとることができ空隙率は小さくなる。一方、等電点から離れると電荷が増大するため、分子間の静電的反発力の影響を受けて空隙率は大きくなる。

対象とするタンパク質をほとんど透過させる精密濾過膜 (孔径0.05 μ m) を用いて、BSA溶液の透過速度を測った結果をFig. 3に示した⁴⁾。図には、濾過速度の逆数 ($d\theta/dv$) が単位膜面積あたりの濾液量 v に対してプロットされており、等電点の pH5.1 で濾過速度が最小となる。膜の細孔内にタンパク質が吸着して、濾過速度が低下するわけであるが、その吸着量は等電点で最大となる。これは、等電点付近でタンパク質が折り畳まれ最も緻密な構造をとり、また分子間の静電的反発力も小さくなるので、一定の吸着表面積に吸着可能

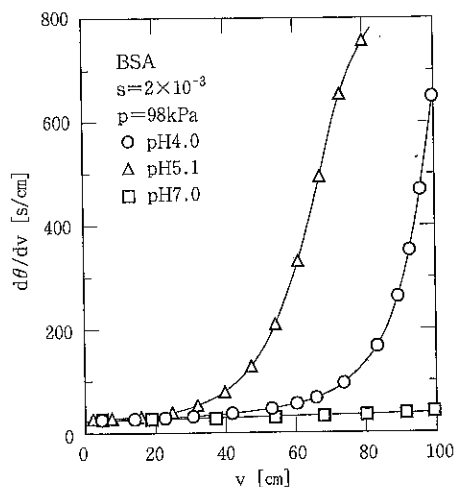


Fig.3 BSA溶液の精密濾過における濾過速度

なタンパク質分子の個数が増大するためである。このように濾過ケーキを形成する場合だけでなく、膜細孔内にタンパク質が吸着してその細孔を閉塞する場合にも、タンパク質の荷電状態はその濾過特性に多大の影響を及ぼすことがわかる。

次に、タンパク質の水和の影響について述べる。タンパク質は水和しているため、その密度は水和の影響を考慮する必要がある。タンパク質溶液の上向流濾過では、重力の作用する方向と反対方向に濾過することにより、濾過速度を一定に保つことができる。ケーキに働く重力がケーキを剝離する推進力となるため、その分離性能は試料中のタンパク質密度に依存する。

Fig. 4は、BSA溶液の上向流濾過における平衡濾過速度 q_e と溶媒密度 ρ との関係を示したもので、溶媒密度はショ糖を添加することによって変化させた⁵⁾。図中の μ は溶媒粘度、 ψ は濾液の流れ方向が重力の方向となす角度である。タンパク質密度と溶媒密度の差が大きいほど濾過速度は大きくなり、溶媒密度がタンパク質密度に等しくなると、濾過速度の平衡値は得られない。したがって、 $q_e \rightarrow 0$ に外挿した切片の値が、タンパク質密度を示す。なお、図中の1.364の値はタンパク質の乾燥密度である。 $q_e \rightarrow 0$ に外挿した切片の値はこの乾燥密度よりかなり小さく、水和を含んだ“浮遊密度”と考えられる。一口に水和といってもいろいろな定義があり、測定法により様々な値が得られるが、この場合には、流体力学的にタンパク質分子と一緒に流動する水分子という意味合いをもつ。上向流濾過では、この値の大小が分離性能

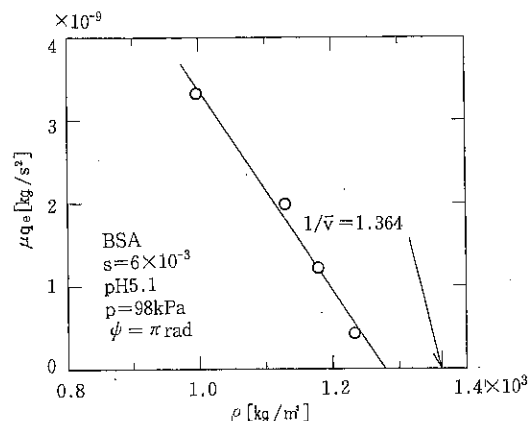


Fig. 4 BSA溶液の上向流限外濾過における溶媒密度の影響

を大きく左右するため、タンパク質の水和量の大小が極めて重要となる。

微粒子懸濁液の沈降特性においても、溶液環境は大きな影響を及ぼす。はじめから圧密沈降が生ずる濃厚なTiO₂懸濁液を用いて沈降実験を行った結果を、沈降界面 H の経時変化としてFig. 5に示した⁶⁾。図中の H_0 は初高である。等電点(pI 6)付近で沈降速度が小さく、緩い構造の沈積層が形成され、等電点より離れると、沈降速度は大きく、沈積層の粒子構造は密になる。等電点付近では、懸濁微粒子の荷電が0となり、ファンデルワールス引力により懸濁微粒子が凝集体を形成するため、脱液速度は小さく、また空隙率の大きな凝集体構造からなる沈積層が形成される。一方、等電点から離れると、高濃度下においても懸濁微粒子の分散が比較的良好的ため、粒状構造の密な沈積層が形成される。ところが興味深いことには、圧搾の場合と同様に平均圧密比を定義し、これを時間に対してプロットすると、ほぼ一本の曲線関係で表される。

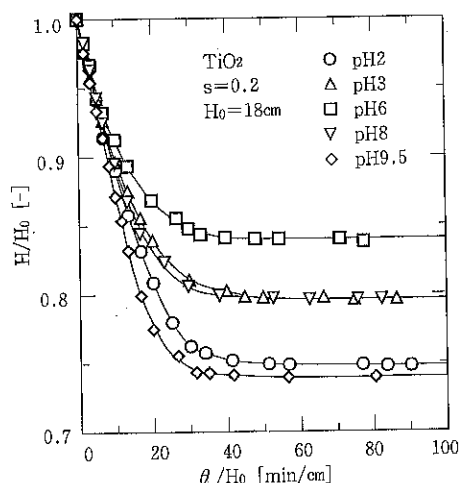


Fig. 5 TiO₂ 懸濁液の圧密沈降

3. 限外濾過のメカニズム

通常、ケーキ濾過における理論推定に必要な懸濁微粒子の特性は、圧縮透過試験により求められる。限外濾過では、対象物質が主として微粒子よりはるかに小さな高分子であるため、圧縮透過試験を行うことは現実には不可能である。しかし、沈降試験を行うと、濾過推定に必要な高分子の特性値が求められる。ただし、高分子は一般にその

サイズが小さく沈降しにくいいため、超遠心場で沈降させる必要があり、また沈降速度などを実際に測定するためには分析用の超遠心機を用いなければならない。ここでは、沈降現象から膜濾過速度を推定することによって得られた一つの成果を述べることにし、その意義を明らかにしたい。

濾過速度に及ぼすpHの影響については、Vilkerら⁷⁾の研究がよく知られている。彼らは理論計算を行い、実測値と比較している。浸透圧のpH依存性からは実験結果を説明できなかったため、拡散係数のpH依存性を考慮して濾過速度に及ぼす影響が説明できたとしている。しかし実際には、計算値は実測値のpHに対する傾向とはまったく異なる。次いで、Opongら⁸⁾は、等電点で沈降速度が最も大きくなるという超遠心沈降データに基づき、濾過と沈降の相関から、等電点で濾過速度も最大となると述べている。しかし、多くの研究者が等電点では濾過速度が最小となることを示している。一方、沈降速度が等電点で最大になることもよく知られた事実である。それでは何故、沈降と濾過とは同じ傾向を示さないのであろうか。等電点以外では分子が電荷をもつため、その荷電効果によって沈降速度は小さくなる。したがって、等電点では確かに沈降速度は大きくなるが、沈降に伴いセルの底部に形成される、タンパク質分子が濃縮された沈積層の空隙率は小さくなる。これは、分子間の反発が生じないためである。したがって、濾過を行って濾過ケーキが形成されるとき、同じ空隙率であるならば、その濾過抵抗は等電点の方が小さくなるが、等電点の場合には生成ケーキの空隙率がかなり小さくなるため、結局、濾過抵抗も大きくなるわけである。Fig. 6には、BSA溶液のデッドエンド濾過の結果を濾過速度の逆数 ($d\theta/dv$) 対単位膜面積あたりの濾液量 v として示した。実線は超遠心沈降データを用いてケーキ濾過モデルに基づき理論計算したもので、こうしたpHの傾向をよく説明できる⁹⁾。

以上のように、タンパク質溶液の限外濾過において、濾過ケーキの果たす役割は極めて大きく、したがって、この特性を明らかにすることが限外濾過機構の本質的な理解に繋がるものと考えられる。Fig. 7にはBSA溶液について膜面傾斜型濾過から下向流濾過に移行した場合と下向流濾過の場

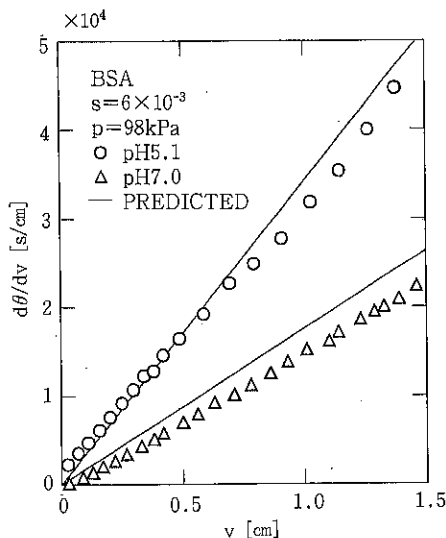


Fig. 6 ケーク濾過モデルによる推定

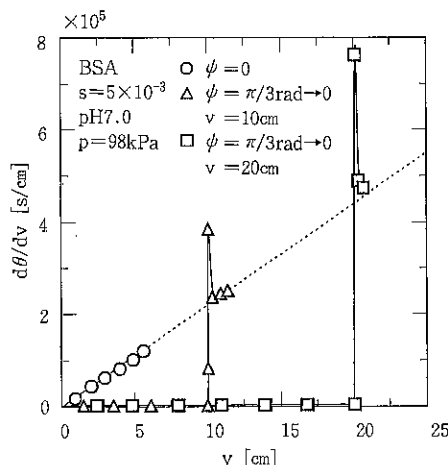


Fig. 7 濾過方式の急変による濾過速度

合における濾過速度の逆数 ($d\theta/dv$) を濾液量 v に対してプロットした¹⁰⁾。途中から下向流濾過に変化させた場合の $d\theta/dv$ 値は初めから下向流濾過を行った場合のプロットの延長線上にあることがわかる。このことは両者の濾過ケーキの構造もほぼ一致することを示唆しており、ケーキ構造がそれまでの濾過方式の影響を受けず、濾液量 v の関数となるものと考えられる。初めから下向流濾過を行うと、ケーキ厚さは極めて小さくケーキ内の濃度分布の測定は困難であるが、途中で膜面傾斜型から下向流濾過へ移行させる本手法によれば、ケーキ厚さをかなり大きくできるため、濃度分布の測定が比較的容易となる。Fig. 8には、ケー

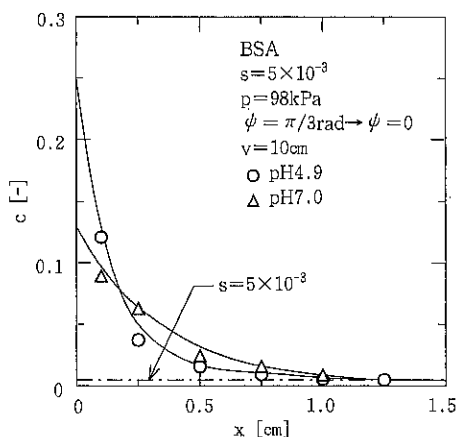


Fig. 8 濾過ケーキ内の濃度分布

ク内の濃度分布に及ぼすpHの影響をBSAの質量分率 c 対膜面からの距離 x としてプロットした。膜面近傍に近づくにつれ濃度が急激に増大し、その傾向は等電点のpH4.9の方が顕著である。これは、pH4.9の方が濾過速度が小さくなることに対応している。

4. 2成分系のケーキ構造

実際の濾過操作では単一成分の物質を濾過することはまれであり、多くの場合、多成分からなる物質を濾過する。この場合には、微粒子や高分子間の相互作用は、単成分系の場合に比べて、さらに複雑となる。

Fig. 9 には、 TiO_2 と SiO_2 の2成分系微粒子懸濁液を、その両者とも阻止する $0.05 \mu\text{m}$ の精密濾過膜を用いてpH4.5の条件下で濾過した結果を示

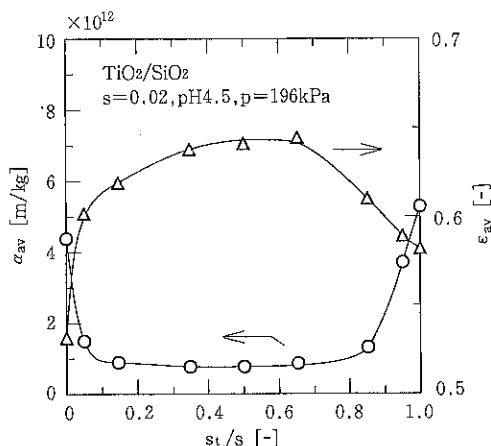


Fig. 9 pH4.5における $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 混合懸濁液の精密濾過特性

した¹¹⁾。 α_{av} と ϵ_{av} が試料中の全固体濃度に占める TiO_2 の質量分率 (s_t/s) に対してプロットされている。2成分系では単成分系の場合より ϵ_{av} の大きなケーキが形成され、その結果 α_{av} は小さくなる。これは、pH4.5では TiO_2 は正、 SiO_2 は負の電荷をもつので引力が働きヘテロ凝集により凝集体が形成されるためである。一方、同一の符号の電荷をもつpH領域では、pH4.5の場合に生じたような2成分系における ϵ_{av} の増大、 α_{av} の減少は認められない。これは、凝集体が形成されず緻密なケーキが得られるためである。

次に、2成分系タンパク質溶液の場合には、微粒子懸濁液の場合とはまったく異なる挙動を示す。Fig. 10には、BSA (MW 67,000, pI 4.9) と卵白リゾチーム (MW 14,300, pI 11.0) の混合溶液を、その両者とも阻止する1万の分画分子量の限外濾過膜を用いてpH6.9の条件下で濾過した結果を示した¹²⁾。 α_{av} と ϵ_{av} が全溶質中のBSAの質量分率 (s_b/s) に対してプロットされている。このpHでは、BSAは負、リゾチームは正の電荷をもつので、両者を混合するとBSA分子間、リゾチーム分子間には斥力が、BSA・リゾチーム分子間には引力が働く。ところが、前述したようにタンパク質は凝集しないため、混合によって支配的となったBSA・リゾチーム分子間の引力の影響を受けて、ケーキはより緻密な構造となり、ある混合比で空隙率 ϵ_{av} が極小となる。このため、その混合比で α_{av} は極大値をとる。一方、同一の符号の電荷をもつpH領域では、溶液中に存在す

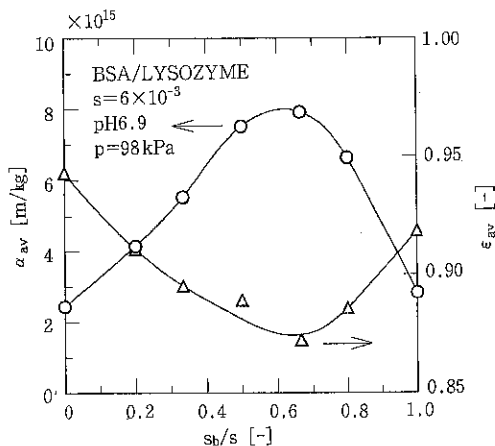


Fig. 10 pH6.9におけるBSA/リゾチーム混合溶液の限外濾過特性

るすべての分子間に静電的反発力が働き、プロットは単調な曲線となる。

さらに、高分子を含有した微粒子懸濁液の限外濾過においては、高分子の吸着などの作用に伴う微粒子の分散・凝集状態の変化が濾過特性に大きな影響を及ぼす¹³⁾。BSAを含有するTiO₂懸濁液の限外濾過で得られたケーキの平均濾過比抵抗 α_{av} を、試料中の全濃度に対するBSAの質量分率(s_b/s)に対してFig. 11にプロットした。BSAはTiO₂に比べ濾過比抵抗が著しく大きいことから、BSAの質量分率が大きくなるに従い α_{av} は増大することが予想され、実際、pH4.2および5.1ではそのような傾向を示した。しかし、pH6.0では、図のようにごくわずかにBSAが含まれる場合に、 α_{av} がTiO₂単成分系($s_b/s = 0$)の場合より小さくなる傾向を示した。このpHでは、TiO₂とBSAは互いに異符号に帯電しているため、BSAの吸着によりTiO₂の正電荷が相殺され、複合体の電位が小さくなり、微粒子が凝集するためと考えられる。さらにBSAの割合が大きくなると電位の符号は逆転し、複合体は負の実効電荷をもち、微粒子は再分散し、 α_{av} は増大する。

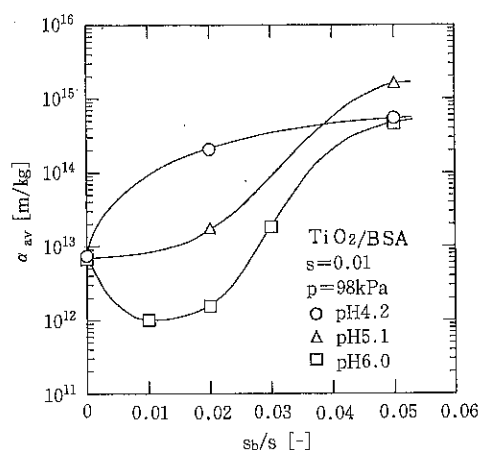


Fig. 11 高分子含有微粒子ケーキの平均濾過比抵抗

5. 分画操作の試み

濾過は濾材や膜のふり機能により分離を行うが、濾過の進行とともに膜面上に濾過ケーキが形成され、このケーキ層が、それ以後、分離の機能を担う。したがって、濾過操作により2つ以上の粒子を分画することは、その粒径比がかなり大き

な場合でも、至難の技である。しかし、最近の濾過操作の高精度化に伴い、濾過においても2成分以上の物質を分画することの重要性がようやく認識され始めている。現在のところ、まだ粒径の小さな物質を取り扱う限外濾過で試みられはじめているにすぎないが、やがて精密濾過やさらに大きな粒径の物質を取り扱う濾過操作においても重要となろう。この場合、分離対象物の物理化学的特性の理解が極めて重要となり、適切な溶媒環境を整え、分子間、あるいは粒子間相互作用を制御することが高度な分離を達成するために必要不可欠となる¹⁴⁾。また、膜面上に形成される濾過ケーキの量の制御も効率的な分画操作を行うために重要となる。たとえば、2成分のタンパク質の分画をより完全に行うためには、非攪拌方式の下向流濾過が最も適するが、この場合には濾過速度が著しく低下するため、上向流や膜面傾斜型濾過、低攪拌型濾過を行い、一定の濾過速度を維持しつつ、しかもできる限り2成分の分画を完全に行うことが効果的である¹⁵⁾。すなわち、分画の精度と濾過速度との両者のバランスから最適操作法を決定する必要がある、ケーキ生成量の適切な制御が重要となる。

ここでは、一例として中空糸膜モジュールを用いたシングル・パス法による2成分系タンパク質溶液の限外濾過による分画操作について述べる。中空糸膜モジュールを垂直に設置すると、傾斜角度が $\pi/2$ radの膜面傾斜型濾過が行われるので、タンパク質やコロイド溶液を対象として極低流速でシングル・パス操作を行うと、クロスフローをほとんど与えなくても膜面上に形成されるケーキが剥離して濾過速度をある一定値に保つことが可能となる¹⁶⁾。しかも、ケーキ表面にかかる剪断力は小さいため、2成分の分画をより効果的に行い得る。BSA(MW 67,000, pI 4.9)とミオグロビン(MW 17,000, pI 7.0)の混合溶液を用いて分子量为5万のポリアクリロニトリル製の中空糸限外濾過膜により種々のpHで膜濾過を行った時の濃縮率 s_o/s_i をFig. 12に示した¹⁷⁾。図中の s_b はBSA濃度、 s_m はミオグロビン濃度、 q_{wo} は濃縮液の質量速度である。分子間に静電的反発力が作用するpH8.6でBSAの濃縮率が大きく、またミオグロビンの濃縮率が小さくなり、効率的な分画が可

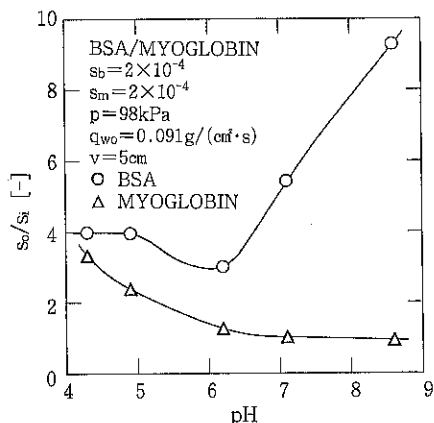


Fig. 12 中空糸膜モジュールによる2成分系タンパク質溶液の分画

能なことがわかる。このpHでBSAの濃縮率が大きくなる原因は、BSAとミオグロビンが共に負の荷電を持つため、空隙率の大きな剥離しやすい濾過ケーキが形成され、濾過速度が大きくなることによる。pH6.2では両者に引力が作用し濾過初期にはBSAとともにミオグロビンも捕捉されるため、濾過速度が小さくなる。pHがさらに小さくなるとpH8.6の場合と同様に静電的反発力が働くが、この場合には、ミオグロビンが膜の荷電の影響を受けて阻止され次第に濃縮され、BSAとほぼ同程度の濃縮率となるため、分画は不可能となる。

高分子を含有する微粒子懸濁液の精密濾過では、一般に微粒子だけを分離膜により捕捉し、高分子は膜を透過させることを目的とする場合が多い。バイオプロセスのダウンストリームにおける菌体粒子とタンパク質との分離、浄水処理のハイブリッド化プロセスにおける微粒子のみの捕捉などは、そのよい例である。BSAを含む Al_2O_3 懸濁液の精密濾過の結果を、Fig. 13にBSAの阻止率 R_b 対濾液量 v として示した¹⁸⁾。図中の s_a はアルミナ濃度である。BSA分子は膜の細孔径に比べ、はるかに小さいにもかかわらず、原液の10~30%程度が阻止される傾向を示した。このほとんどが Al_2O_3 粒子表面へのBSA分子の吸着に基づくことが吸着試験により明らかにされている。

分画操作の応用として、有機物を含有する微粒子懸濁液を対象に、精密濾過膜と活性炭成形膜を重ね合わせた複層膜を用い、濾過機能をもつ精密

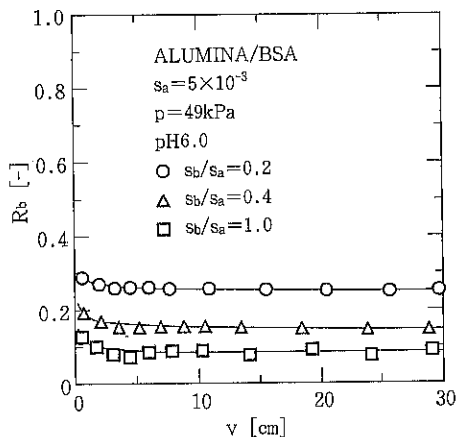


Fig. 13 精密濾過膜によるBSAの阻止率

濾過膜で微粒子のみを、吸着機能をもつ活性炭膜で有機物のみを捕捉し、分離を行うことも試みられている¹⁹⁾。Fig. 14にフェノールを含有する SiO_2 懸濁液に対して精密濾過膜のみの場合と複層膜を用いた場合の比較をフェノールの阻止率 R_p 対濾液量 v として示した。図中の s_s は SiO_2 濃度、 c_p はフェノール濃度である。活性炭成形膜を加えることによりフェノールがかなり阻止されていることがわかる。濾過速度はともにRuthのケーキ濾過式に従う直線関係を示し、2つのプロットはほぼ一致していることから、フェノールが活性炭に吸着しても濾過速度には影響を及ぼさないことがわかる。

2成分系タンパク質溶液の沈降についても、溶液環境がその分離特性に大きな影響を及ぼす。分析用超速离心机を用いると、沈降界面の経時変化を測定することができる。BSA (pI 4.9) と卵白リ

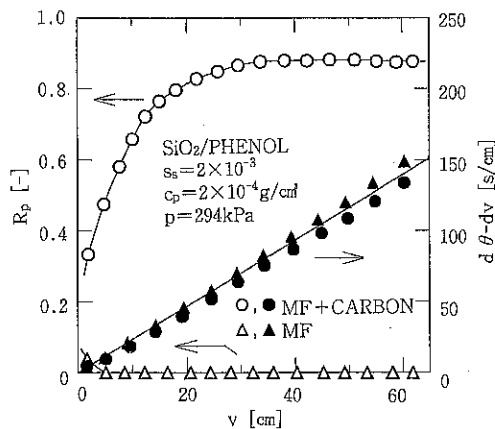


Fig. 14 複層膜によるフェノールの阻止率

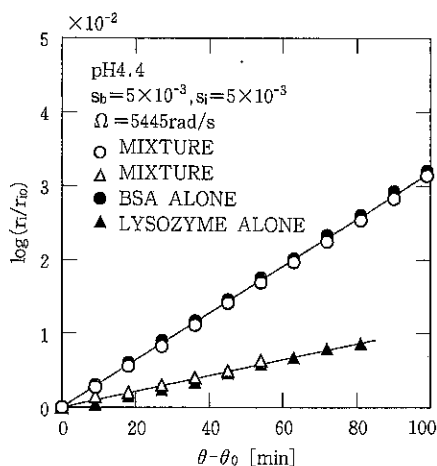


Fig.15 2成分系タンパク質溶液の超速心沈降

ゾチーム (pI 11.0) の混合溶液を用いて pH4.4 で行った角速度 $\Omega = 5445 \text{ rad/s}$ における沈降実験の結果を Fig.15 に示した²⁰⁾。図中のプロットの勾配の大小が沈降速度の大小と対応する。2成分系溶液の沈降過程では、沈降速度が大きく異なる2つの沈降界面が生じていることがわかる。すなわち、単成分系溶液の超速心沈降の結果と比較すると、沈降速度の大きい方の界面はBSA溶液の結果と、また沈降速度の小さい方の界面はリゾチーム溶液の結果とほぼ一致することがわかる。2成分系溶液の場合にも、このpHではBSA分子とリゾチーム分子はそれぞれがお互いの影響をほとんど受けず独立に沈降しているものと推察される。これは、pH4.4ではBSA、リゾチーム分子は共に正の電荷をもち、両者の分子間には静電的反発力が働くためと考えられる。したがって、両分子が同一の符号をもつことが、試料中の成分の分画にはより適している。

一方、BSAとリゾチームが反対の符号をもつpH領域では、沈降界面は一つだけ観測され、BSAの単成分系溶液の場合の沈降速度よりさらに大きくなった。この場合には、両者の分子間には引力が働き、BSA分子とリゾチーム分子とが複合体を形成して沈降しているものと推測されるので、その沈降速度はBSAの沈降速度よりさらに大きくなる。このことから、タンパク質が混合した試料を単に濃縮する場合には、両分子が反対の符号をもつ溶液環境が望ましいことがわかる。

5. おわりに

粒子・流体系分離操作の中から、濾過および沈降操作を中心に、最近のトピックスについて概説した。濃縮脱水操作の対象となる粒子が次第に微細化しつつあるとともに、微粒子を分ける、いわゆる分画操作も、資源の有効利用や環境への負荷低減の観点から、次第に要求されるようになりつつある。このためには、これまであまり考慮されていなかった分離対象物のミクロな特性を明らかにし、これに基づいて分離操作の最適化を図る必要があり、粒子・流体系分離も今新たな展開を迎えようとしている。

参考文献

- 1) E. Iritani, Y. Toyoda and T. Murase: *J. Chem. Eng. Japan*, 30, 614-619(1997)
- 2) 神谷, 向井, 入谷: 化学工学会第31回秋季大会研究発表講演要旨集, 第2分冊, p. 115 (1998)
- 3) E. Iritani, S. Nakatsuka, H. Aoki and T. Murase: *J. Chem. Eng. Japan*, 24, 177-183(1991)
- 4) E. Iritani, Y. Mukai, Y. Tanaka and T. Murase: *J. Membrane Sci.*, 103, 181-191 (1995)
- 5) E. Iritani, T. Watanabe and T. Murase: *J. Membrane Sci.*, 69, 87-97(1992)
- 6) 橋本, 曾, 入谷, 村瀬: 化学工学会第63年会研究発表講演要旨集, 第1分冊, p. 332 (1998)
- 7) V. L. Vilker, C. K. Colton and K. A. Smith: *AIChE J.*, 27, 637-645(1981)
- 8) W.S. Opong and A.L. Zydney: *J. Colloid Interface Sci.*, 142, 41-60(1991)
- 9) E. Iritani, K. Hattori and T. Murase: *J. Chem. Eng. Japan*, 27, 357-362(1994)
- 10) 萩原, 曾, 向井, 入谷: 化学工学会第31回秋季大会研究発表講演要旨集, 第2分冊, p. 121(1998)
- 11) 入谷, 豊田, 村瀬: 化学工学会第63年会研究発表講演要旨集, 第1分冊, p. 50(1998)

- 12) E. Iritani, Y. Mukai and T. Murase: *Trans. IChemE, Part A (Chem. Eng. Res. Des.)*, 73, 551-558(1995)
- 13) 向井, 木目, 入谷, 村瀬: 化学工学会第63年会研究発表講演要旨集, 第1分冊, p. 328 (1998)
- 14) E. Iritani, Y. Mukai and T. Murase: *Sep. Sci. Technol.*, 30, 369-382(1995)
- 15) Y. Mukai, E. Iritani and T. Murase: *Sep. Sci. Technol.*, 33, 169-185(1998)
- 16) E. Iritani, Y. Murakami and T. Murase: *J. Chem. Eng. Japan*, 28, 614-616(1995)
- 17) 入谷, 工藤, 村瀬: 化学工学会第62年会研究発表講演要旨集, 第2分冊, p. 185(1997)
- 18) 向井, 小田, 入谷: 化学工学会第31回秋季大会研究発表講演要旨集, 第3分冊, p. 315 (1998)
- 19) 小田, 入谷, 村瀬: 化学工学会第29回秋季大会研究発表講演要旨集, 第1分冊, p. 30 (1996)
- 20) 入谷, 赤塚, 村瀬: 化学工学論文集, 23, 224-229(1997)

特許一言メモ No.163

商標情報もインターネットで

特許庁は無料で、インターネットを通じた約200万件の商標出願・登録情報提供サービスを31日から始めると発表した。200万件もの商標情報のインターネットによる提供は世界で初めて。先出願・権利が存在するかどうかの先願調査のほか、商標権の権利取得可能性の有無の判断に活用できる。今後、同庁は10月に著名商標、2000年1月から英語版の出願・登録の提供サービスを実施する方針。提供するデータは商標のほか、出願番号、権利

者、登録日など49項目。商標登録制度は文字、図形、記号、立体的形状について、識別性のないものや公益上の理由から登録を受けることができないもの、私益保護の見地から登録を受けることができないものなどを除いて商標登録できる。

登録により権利者はだれからも排除されることがなく、指定商品や指定役務に関する登録商標を10年間使うことができ、何度でも更新可能。

(日刊工 10.7.24より)

静電微粒化法による単分散粒子の作成

Production of Monodispersed Particles by Electrohydrodynamic Spraying

森 康維*

Yasushige Mori

1. はじめに

液体から微粒子を得る方法は、液体を微小液滴にし、乾燥操作などで溶媒を除去し、固形粒子を得る方法が一般的である。液体の微粒化法のうち二流体ノズルやネブライザーに代表される圧力エネルギーを使用する方法が主流である。また機械的振動エネルギーを加える方法もよく使用されており、超音波噴霧法や振動オリフィス法が代表的な方法である。その他に回転円盤などを用いた遠心力を利用する微粒化法もある。振動オリフィス法を除いてこれらの方法では多量の液体を短時間の内に微粒化することができる。これに対して静電微粒化法は、電気エネルギーをノズル先端の液体に加え、ノズルから流出する液柱を微細液滴に分裂させる方法である。生成液滴径をサブミクロンから数ミリメートルまで幅広く変えることができ、しかも比較的単分散の液滴が得られる。しかし静電微粒化法は、大量処理に向いていない。このため液体燃料噴霧¹⁾、静電塗装²⁾、農薬散布³⁾などに応用されているにすぎない。静電微粒化法では単分散性の高い液滴が得られることから、これを利用して固体粒子を作成すると、適切な大きさの単分散粒子が少量であるが、入手可能となる。そこで本解説では、まず静電微粒化現象について

概説した後、微粒子作成の最近の例を紹介すると共に、問題点について述べたい。

2. 静電微粒化現象

2.1 静電微粒化法とは

図1のような装置を用いて、細管と対向電極板（この図では同心円板）の間に電圧を印加すると、滴下する液滴の径が次第に小さくなり（dripping mode）、ある電圧で急に小さな液滴（霧化）が発生する（cone-jet mode）。これは図2に示すように、液滴表面に蓄えられた電荷によって、液体の表面積を拡大する力が発生し、小さな液滴となって落下する。さらに静電気力が増すと、ノズル先端の液滴が引き延ばされ、テーラーコーン（Taylor cone）と呼ばれる円錐体ができる。

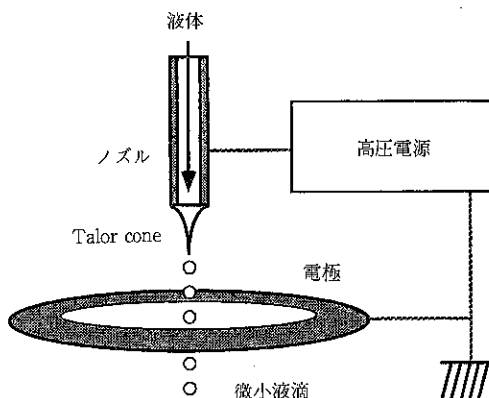


図1 静電微粒化法の装置図

*同志社大学工学部物質化学工学科

(〒610-0321 京都府京田辺市多々羅都谷1の3)

TEL: 0774-65-6626 FAX: 0774-65-6847

E-mail: ymori@mail.doshisha.ac.jp

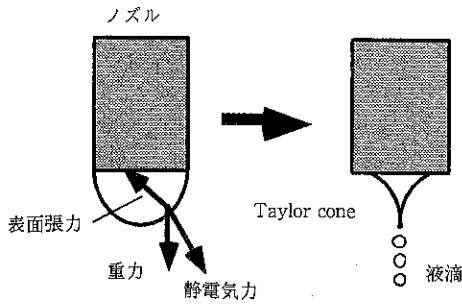


図2 静電微粒化液滴の発生原理

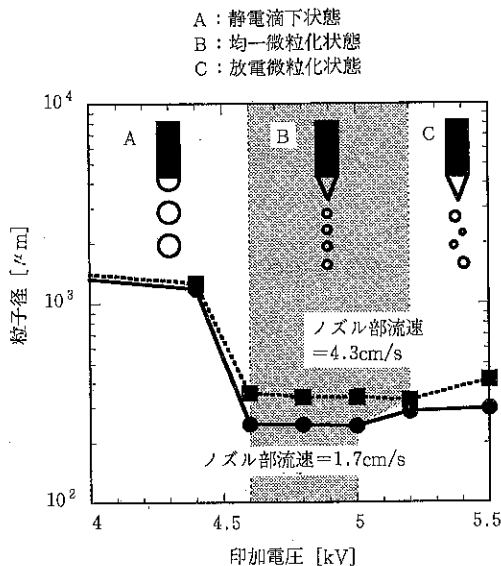


図3 静電微粒化液滴の発生様式と生成したシリカ粒子径の関係

Taylor coneの先端から霧状の液滴が発生する。図3には、高導電率である水ガラス（ケイ酸ナトリウム水溶液）からシリカ粒子を作成した結果を示す。ノズルには内径0.4mm、外径0.7mmの細管を使用し、電極間距離を6mmとした。印加電圧を増すにつれ、シリカ粒子径は小さくなる。約4.6kVの印加電圧までの静電滴下状態(dripping mode), それ以上の印加電圧での均一微粒化状態(conejet mode)が見られた。図から明らかに両領域での生成液滴径が異なることがわかる。さらに印加電圧を増加させると、電流量が急に増す放電微粒化状態が見られた。この状態での平均粒子径は余り変わらないが、粒子径分布が広がった。

静電微粒化(electrostatic spray)という言葉は、

前二者の状態を含む場合なのか、あるいはcone-jet modeのみを対象にした場合なのかはあまり明確にされていない。そこでCloupeauら^{4,5)}はcone-jet modeのように、電気力が液滴生成の主要因となる場合を特にelectrohydrodynamic spraying (EHDS)と呼んでいる。

2.2 静電微粒化現象の研究

図1に示したように、金属製細管と対向電極間に電圧を印加すると、発生液滴が小さくなり、ついには霧状になることが、古くから観察されていた。Drozin⁶⁾は印加電圧を変化させて、ガラス細管からの液滴の滴下状態を観察した。Taylor⁷⁾は細管先端で液体が円錐体(cone)を形成し、その先から霧状の液滴が発生することを観察し、液体の帯電と表面張力との釣り合い式からconeの円錐角を49.3°と計算した。以来この円錐体をTaylor coneと呼ぶようになった。

日本でも古くから静電微粒化の研究が行われていた。蒸留水を用いた藤本ら⁸⁾の研究、均一微粒化を目的とした棚沢ら⁹⁾の研究や、溶液の導電率や電極間距離を変えた実験から無次元相関式を導出した森ら¹⁰⁾の研究がある。緒方ら¹¹⁾は12種類の液体を用いた実験から、微粒化可能な液体の導電率と電荷緩和時間の範囲を明らかにした。

Cloupeauら^{4,5,12)}は微粒化様式を詳細に調べ、Taylor coneの見られる領域をcone-jet modeと名付け、 10^{-9} から 10^{-1} S/mの導電率を持つ液体が微粒化するとした。これは緒方ら¹¹⁾が示した範囲より幾分広いが同様の結果である。Cloupeauら⁴⁾のレビューをうけ、Graceら¹³⁾は1990年から94年までの文献を集め、cone-jet modeとなる流体の流量と溶液物性との関係を調べた。Smith¹⁴⁾やHayatiら¹⁵⁾は低導電率液体でも微粒化が可能なることを明らかにした。Harpurら¹⁶⁾は電気的緩和時間(electrical relaxation time) τ_e 、流体力学的緩和時間(hydrodynamic relaxation time) τ_h および粘性的緩和時間(viscous relaxation time) τ_v を用いてcone-jet modeで均一な微細液滴が得られる条件を次式とした。

$$\tau_e \approx \tau_v, \quad \tau_e/10 \leq \tau_h \leq 10\tau_e \quad (1)$$

2.3 生成液滴径の推定

グリセリン水溶液を用い130 mPa sまでの溶液に対して、緒方ら^{17,18)}は次のような相関式を導出した。

$$\frac{d_p}{D_i} = 6.5 We^{\frac{2}{9}} \left(\frac{\tau_e}{\tau_h} \right)^{\frac{2}{9}} \left(\frac{V}{\sqrt{D_o \gamma / \epsilon_0}} \right)^{-\frac{10}{9}} \left(\frac{L}{D_i} \right)^{\frac{2}{5}} \left(\frac{\mu}{\sqrt{D_i \rho \gamma}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

使用した全データを、±45%の範囲で相関しているが、ノズルの内径を基準にしている点が他の研究者と異なっている。

森ら¹⁰⁾は次のような相関式を提案した。

$$\frac{d_p}{D_o} = 5.39 Es^{-0.255} We^{0.277} \{(\rho Q)/(\mu D_o)\}^{-0.124} \quad (3)$$

無次元数 Es 中には、次式で定義されるノズル先端の電界強度 E_0 が含まれている。

$$E_0 = (4V)/\{D_o \ln[(8L)/D_o]\} \quad (4)$$

しかし(3)式はエタノール水溶液に対しては良い相関が得られなかった。そこで山口ら¹⁹⁾は Es を溶液物性の関数と考え、種々の溶液の実験結果から次の式を導いた。

$$d_p/D_o = 9.35 Es^m We^{0.16} Ca^{0.07} (\tau_e/\tau_h)^{0.08} \quad (5)$$

$$\text{ここで } m = -9.2(\tau_e/\tau_h)^{0.24} \quad (6)$$

(5)式は $2.53 < Es < 6.64$, $0.0005 < We < 0.05$, $0.0001 < Ca < 0.1$, $1.0 \times 10^{-6} < \tau_e/\tau_h < 0.1$ の条件下で誤差±30%の範囲で相関された。

低導電率溶液に対する相関式には、ヘプタンに帯電防止剤を添加して導電率を 7×10^{-11} から 10^{-9} S/m に変えた実験を基にした Tang ら²⁰⁾ の報告がある。

$$\tilde{d} = \tilde{Q}^{\frac{2}{3}} \left\{ 0.37 + 0.49 \tilde{Q}^{-0.11} \exp \left(-\frac{0.56 \tilde{Q}^{0.5} (V - V_s)}{V_s} \right) \right\} \quad (7)$$

2.4 ノズルや電極の形状の影響

前節で述べたように、微粒化液滴の大きさと操作条件の関係が未だ明確でない。またノズルや電

極の形状がどのように影響するのか、明確にした論文は少ない。森ら¹⁰⁾はノズル先端の仕上げが微粒化現象に影響を及ぼすとしているが、具体的には述べていない。また多くの研究では、先端を直角(電極板と平行)に仕上げた直管をノズルに採用している。

Cloupeau ら⁵⁾は先細りになった管と直管の2種類のノズルを用いて実験している。前者のノズルを使うと管外壁が濡れるが、安定な微粒化が得られるとしている。Rosell-Llompart ら²¹⁾は先端を80度あるいは25度にカットしたノズルでサブミクロンの液滴を作成しているが、液滴分布が多峰性となった結果しか得ていない。Chen ら²²⁾は先端を75度にカットしたノズルでしょ糖水溶液を微粒化している。このノズルでは液のはい上がり現象が見られ、ある条件下で silver bullet mode と呼ぶ領域が現れ、cone-jet mode より単分散性の高い液滴が作成されることを見いだした。Kim ら²³⁾はガラスの細管にタングステンの細線を入れたノズルを使用した。ノズルの接近写真から、細線はノズル外壁における液体の濡れを防いでいるように思われる。

3. 静電微粒化による微粒子作成

固体微粒子を静電微粒化で作成するには、次のような3通りの方法に分類できる。

第1の方法は、融点の低い固体物質を加熱溶解し、静電霧化する方法である。微粒化液滴を気相中で冷却し、固体微粒子とする。この際気体に酸素、窒素あるいは水素を用いると、化学反応を利用して酸化物、窒化物あるいは金属粒子を得ることができる。Bollini ら²⁴⁾は高温真空中でスズやビスマスなどの溶融金属を静電微粒化した。内径200 μm 、外径410 μm のノズルを用いて150から600 μm の微粒子を得ている。真空度が高くなるほど粒子径の大きい粒子を得ている。また Mathoney ら²⁵⁾は、ノズルを用いないで金属細線に電圧を印加し、先端を溶解して直接噴霧して金属微粒子を得ている。金属細線が微粒化して減るため、これを供給する方法を考え、パラジウム粒子作成を報告している。しかし個々の粒子は球形であるものの、数10 μm から150 μm とかなり幅広い粒子径分布のある結果しか得ていない。

溶液を静電霧化し気流中で溶媒を蒸発させ固形分を得る、いわゆる噴霧乾燥法や、溶媒除去と同時に熱分解あるいは反応を起こして粒子を得る、いわゆる噴霧熱分解法が第2の方法に相当する。通常は二流体ノズルなどが使用されるが、静電微粒化法で液滴を発生させる、微小粒子を必要とするセラミックス分野からいくつか報告されている。Rulisonら²⁶⁾は硝酸イットリウムを含むプロパノールを静電微粒化し、熱分解で170から290 nm径の酸化イットリウム粒子を作成した。また奥山ら²⁷⁾は硝酸亜鉛や硝酸カドミウムとチオ尿素のエタノール溶液を静電霧化し、0.1 μm 以下の硫化物粒子を作成した。また静電微粒化用のノズルを1本から4本まで増やし、その効果を検討したが、ノズル配置が幾何学的に対称でないと良い結果が得られなかったと報告している。

第3の方法として、静電微粒化液滴から固体微粒粒子を得る際に溶液を使用する方法が挙げられる。水ガラス（ケイ酸ナトリウム水溶液）を静電微粒化し、アルコールで受け止め脱水固化した後、希硫酸水溶液でナトリウムイオンを取り除き、粒子径の揃ったシリカ粒子を作成する方法がある。次節で示すが、佐藤ら²⁸⁾は操作条件を変更することで30から500 μm の粒子を得ている。また渡辺ら²⁹⁾や木村ら³⁰⁾の実験のように、アルギン酸ナトリウム水溶液を静電微粒化し、塩化カルシウム水溶液で受け止め、0.2から4 mmのゲル粒子を得る方法もこれに属する。得られたゲル粒子を酵素の固定化担体に利用しようとしているが、酵素の取り込み量、有効な酵素量などの点で今後の検討が必要な段階である。

なお微粒子ではないが成膜に応用した例がある。対向電極表面にポリマー（cellulose acetate）の薄膜（約300 nm厚）を作る方法をHoyerら³¹⁾が報告している。溶媒キャスト法より均一で優れているとしている。また van Zomerenら³²⁾はCVDやPVDの成膜速度が遅いことから、静電微粒化を用いた薄膜作成法を提案し、5 $\mu\text{m/hr}$ の速度で LiMn_2O_4 膜を作成している。

4. 水ガラス水溶液の静電微粒化によるシリカ粒子の作成

4.1 直流電場を利用した粒子生成

水ガラス水溶液を微粒化し、メタノールで脱水・固化して、作成されたシリカ粒子の写真を図4に示す。粒子がドーナツ状に写っているのは、粒子中心部に存在していた水が脱水され、中空の粒子になったためと考えられる。粒子の外側から内側に向かって脱水が起こるため、適当な脱水速度を有する溶媒を選択する必要がある。脱水速度が遅いと非球形粒子となり、逆に速いと球形粒子ができて内部からの流出水圧力のため破損する。我々の場合³³⁾はメタノールあるいは水を添加したメタノールが適当な脱水溶媒であった。同様な実験をした佐藤らの場合では、2-プロパノール³⁴⁾やエタノール²⁸⁾が適切であったとしている。

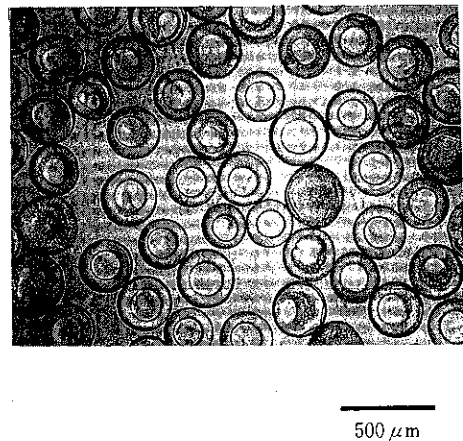


図4 静電微粒化法で作成したシリカ粒子の写真（平均粒子径270 μm ）

図5にはこのようにして固化・生成したシリカ粒子の粒子径分布を示す。印加電圧が4.6 kVの時は均一微粒化領域であり、5.5 kVになると放電微粒化領域となる。前者の状態では、平均粒子径350 μm 、均一度（標準偏差／平均粒子径）0.04のかなり均一度の高い粒子が生成している。これに対して放電微粒化領域では多分散となっている。粒子径分布の両端を無視して対数正規分布と仮定すると、幾何標準偏差は1.3程度となる。このような条件下の静電微粒化法でも、他の方法と比較すれば液滴径の揃った微粒化法と言える。

4.2 交流電場を重畳した場合

静電微粒化法の長所に液滴径分布が狭いことが上げられるが、液晶表示板のセパレータ、液体ク

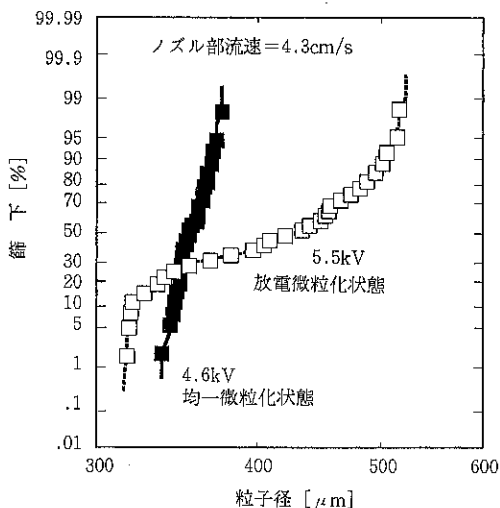


図5 静電微粒化法で作成したシリカ粒子の粒子径分布

ロマトグラフィーの充填材や標準径粒子など厳密な意味での単分散粒子の製造が望まれるようになってきた。cone-jet modeでの液柱分裂に、交流電圧を利用することを佐藤ら^{35,36)}は提案し、数Hzから数kHzの交流電圧を印加することで、均一な気泡や水滴を作成している。さらに最近佐藤ら³³⁾は直流に交流を加えた電圧（直流重畳交流電圧）を用いて非常に均一度の高いシリカ粒子の作成を報告している。

我々は佐藤らと同様の系で、直流電圧に交流を印加する場合の交流周波数と交流印加電圧の静電微粒化現象に与える影響を検討した³⁷⁾。するとある条件下で、粒子径分布が更に狭くなる領域が現れた。この理由をTaylor cone部における液滴放出頻度と、交流周波数が同期するためではないかと考えている。ストロボスコープと接写TVカメラを利用して、Taylor cone部先端から滴下する液滴を観察したところ、ストロボスコープの発光周波数と完全に同期して液滴が落下する条件が見出された。図6にその領域を同期領域として示している。直流電圧5kVの上に所定の交流電圧を重畳した実験結果であるが、予想に反して同期領域が二つ存在していることが判明した。一つは100Hz前後に、他の一つは300Hz前後にあり、重畳する交流電圧が増すと、二つの同期領域に挟まれた非同期領域の区間が減少していく。直流電圧のみ（交流電圧が0の場合）の静電微粒化では、

平均粒子径から求めた液滴発生頻度は、約300Hzとなり、図6の高周波数側に属している。そこで図6中の(a)の操作条件で、交流周波数のみを変えた場合の生成シリカ粒子の粒子径分布を図7に示す。同期領域である300Hzと70Hzは均一度が0.02と非常に揃った粒子が得られている。この数値は標準ラテックス粒子に相当する値である。一方、境界である遷移領域の均一度は0.08、非同期領域では0.18と悪くなっている。図6の(c)のように、交流周波数を一定として交流電圧を変化させても生成粒子径はほとんど変わらなかった。また図6の(b)のように、交流周波数のみを変化させると、生成粒子径は変化し、脱水による収縮率を考慮して液滴径と比較すると、交流の1周期毎に1滴生成していると考えた液滴径にほぼ一致する。

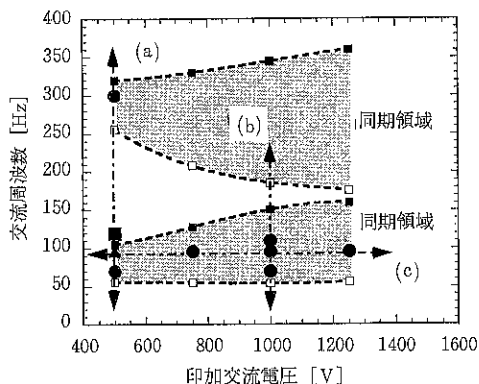


図6 交流を重畳した場合の静電微粒化液滴の分類

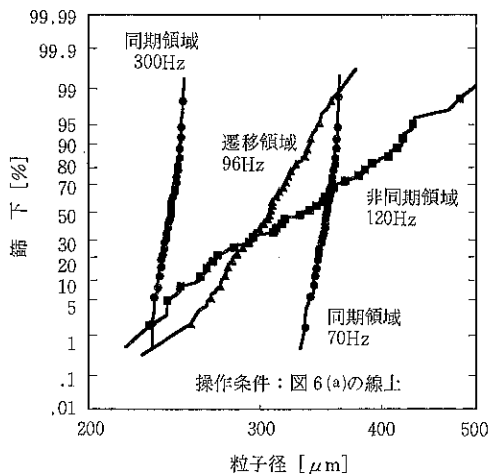


図7 交流重畳静電微粒化法で作成したシリカ粒子の粒子径分布 (図6の(a)の実験条件)

このようなことから、同期領域下では予測可能な大きさの揃った液滴が発生していると推定される。

5. おわりに

静電微粒化法で作成された液滴は、同符号電荷を持っているため自己分散性があり、またその電荷量を容易に制御できる点から、従来の噴霧法と異なる特徴がある。またcone-jetモードでは均一な液滴が得られ、さらに交流電場を重畳することで液滴径の均一性が向上する。しかしこれらの長所があるにもかかわらず、広範囲で使用されないのは、生成する絶対量があまりにも小さいためである。今後は上述の特徴を損なうことなくスケールアップ化する手法の提案や、少量でも有用であるファイン化への応用が望まれる。

記 号 表

d_b : 微粒化した液滴径	[m]
D_i : ノズルの内径	[m]
D_o : ノズルの外径	[m]
E_0 : ノズル先端の電界強度	[Vm ⁻¹]
L : 電極間距離	[m]
Q : 分散相液体の流量	[m ³ s ⁻¹]
U : ノズルでの分散相流速	[ms ⁻¹]
V : 印加電圧	[V]
V_s : cone-jet modeの開始電圧	[V]
ϵ_0 : 真空誘電率	[Fm ⁻¹]
ϵ_f : 分散相液体の比誘電率	[-]
γ : 表面張力あるいは界面張力	[Nm ⁻¹]
σ : 分散相液体の導電率	[Sm ⁻¹]
μ : 分散相液体の粘性係数	[Pa s]
ρ : 分散相液体の密度	[kgm ⁻³]

無次元量

$$\tau_e = (\epsilon_f \epsilon_0) / \sigma, \quad \tau_v = (D_o^2 \rho) / \mu, \quad \tau_h = D_o / U, \quad Ca = (\mu U) / \gamma$$

$$Es = (\epsilon_0 E_0^2 D_o) / \gamma, \quad We = (\rho U^2 D_o) / \gamma$$

$$\bar{d}^3 = \{ \rho \sigma^2 d_p^3 \} / \{ (\epsilon_f \epsilon_0)^2 \gamma \}, \quad \bar{Q} = (\rho \sigma Q) / (\epsilon_f \epsilon_0 \gamma)$$

引用文献

- 1) Lawton, J. and Weinberg, F. J.: Electrical Aspects of Combustion, Oxford University Press (1969)
- 2) Hines, R. L.: Electrostatic atomization and spray painting, J. Appl. Phys., 37 (1966) 2730-36
- 3) Inculet, I. I., Surgeoner, G. A., Haufe, W. O., Hodgson, K. J. and de Almeida, L. P.: Spraying of electrically charged insecticide aerosols in enclosed spaces, Part I, IEEE Trans. Ind. Appl., IA-20 (1984) 677-81
- 4) Cloupeau, M. and Prunet-Foch, B.: Electrostatic spraying of liquids: Main functioning modes, J. Electrostat., 25 (1990), 165-84
- 5) Cloupeau, M. and Prunet-Foch, B.: Electrohydro-dynamic spraying functioning modes: A critical review, J. Aerosol Sci., 25 (1994), 1021-36
- 6) Drozin, V. G.: The electrical dispersion of liquids as aerosols, J. Colloid Sci., 10 (1955) 158-64
- 7) Taylor, G. I.: Disintegration of water drops in a electric field, Proc. R. Soc. London, A280 (1964) 383-97
- 8) 藤本元, 小西義孝, 平田邦彦, 細井宣英, 佐藤豪: 静電微粒化現象の研究, 日本機械学会論文集 [第2部], 32 (1966) 779-87
- 9) 棚沢泰, 荒木信幸: 静電気力による均一微粒化, 日本機械学会論文集 [第2部], 37 (1971) 779-87
- 10) 森康夫, 土方邦夫, 長崎孝夫: 静電均一微粒化の基礎的研究, 日本機械学会論文集B編, 47 (1981) 1881-90
- 11) 緒方純俊, 篠原久: 静電微粒化に適する液体の電気的性質, 化学工学論文集, 3 (1977) 586-92
- 12) Cloupeau, M. and Prunet-Foch, B.: Electrostatic spraying of liquids in cone-jet modes, J. Electrostat., 22 (1989), 135-59

- 13) Grace, J.M. and Marijnissen, J.C.M.: A review of liquid atomization by electrical means, *J. Aerosol Sci.*, 25 (1994), 1005-19
- 14) Smith, D.P.H.: The electrohydrodynamic atomization of liquids, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, IA-22 (1986) 527-35
- 15) Hayati, I., Bailey, A.I. and Tadros, Th. F.: Investigations into the mechanisms of electrohydrodynamic spraying of liquids. I. Effect of electric field and the environment on pendant drops and factors affecting the formation of stable jets and atomization, *J. Colloid Interface Sci.*, 117 (1987) 205-21
- 16) Harpur, I.G., Bailey, A.G. and Hashish, A.H.: A design method for the electrostatic atomization of liquid aerosols, *J. Aerosol Sci.*, 27 (1996) 987-96
- 17) 緒方純俊, 波多江俊, 将口和夫, 篠原 久: 静電微粒化における平均粒径の無次元相関, 化学工学論文集, 3 (1977) 132-36
- 18) 緒方純俊, 将口和夫, 波多江俊, 篠原 久: 静電霧化微滴の平均滴径, 化学工学論文集, 4 (1978) 656-58
- 19) 山口 学, 松井 章, 村上英樹, 片山 俊: 直流電場におけるニュートン流体の均一微粒滴生成, 化学工学論文集, 21 (1995) 357-64
- 20) Tang, K. and Gomez, A.: Monodisperse electrosprays of low electric conductivity liquids in the cone-jet mode, *J. Colloid Interface Sci.*, 184 (1996) 500-11
- 21) Rosell-Llompарт, J. and de la Mora, J. F.: Generation of monodisperse droplets 0.3 to 4- μ m in diameter from electrified cone-jets of highly conducting and viscous liquids, *J. Aerosol Sci.*, 25 (1994) 1093-119
- 22) Chen, D.R., Pui, D.Y.H. and Kaufman, S.L.: Electrospraying of conducting liquids for mono-disperse aerosol generation in the 4 nm to 1.8 μ m diameter range, *J. Aerosol Sci.*, 26 (1995) 963-77
- 23) Kim, K. and Turnbull, R.J.: Generation of charged drops of insulating liquids by electrostatic spraying, *J. Appl. Phys.*, 47 (1976) 1964 - 69
- 24) Bollini, R., Sample, S.B., Seigal, S.D. and Boarman, J. W.: Production of monodisperse charged metal particles by harmonic electrical spraying, *J. Colloid Interface Sci.*, 51 (1975) 272-77
- 25) Mahoney, J.F., Taylor, S. and Perel, J.: Fine powder production using electrohydrodynamic atomization, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, IA-23 (1987) 197-204
- 26) Rulison, A. J. and Flagan R. C.: Synthesis of Yttria powders by electrospray pyrolysis, *J. Am. Ceram. Soc.*, 77 (1994) 3244 - 50
- 27) 奥山喜久夫, Lenggoro, I. W., 田上敬一, 玉城真吉, 峠登: 静電噴霧熱分解法による金属硫化物超微粒子の製造, 粉体工学会誌, 33 (1996) 192-98
- 28) 佐藤正之, 羽鳥敏洋, 井川智子, 斎藤正浩, 大嶋孝之: 大幅な粒径制御が可能な均一シリカ粒子の生成法, 静電気学会誌, 20 (1996) 294-300
- 29) 渡辺秀夫, 松山達, 山本英夫: 静電微粒化法による固定化酵素粒子作製とその評価, 粉体工学会誌, 34 (1997) 679-83
- 30) 木村貴光, 福本友祐, 森康維: 静電微粒化法による均一径粒子の作成, 1998年度粉体工学会春期研究発表会講演論文集, (1998, 京都) 48-51
- 31) Hoyer, B., Sorensen, G., Jensen, N., Nielsen, D.B. and Larsen, B.: Electrostatic spraying: A novel technique for preparation of polymer coatings on electrodes, *Anal. Chem.*, 68 (1996) 3840-44
- 32) van Zomeren, A. A., Kelder, E. M., Marijnissen, J.C.M. and Schoonman, J.: The production of thin films of LiMn₂O₄ by electrospraying, *J. Aerosol Sci.*, 25 (1994) 1229-35
- 33) 森康維, 福本友祐: 静電微粒化現象を利用したシリカ粒子の作成, 第5回微粒化シンポジ

- ウム講演論文集, (1996, 横浜) 43-47
- 34) 佐藤正之, 高橋久司, 大嶋孝之, 栗津正志: 超均一シリカ粒子生成メカニズムの実験的検討, 第6回微粒化シンポジウム講演論文集, (1997, 神戸) 5-8
- 35) 佐藤正之, 宮崎茂, 黒田正和, 佐賀井武: 交流周波数同期による均一気泡生成, 化学工学論文集, 7 (1981) 115-19
- 36) Sato, M.: The production of essentially uniform-sized liquid droplets in gaseous or immiscible liquid media under applied A. C. potential, *J. Electrostat.*, 15 (1984) 237-47
- 37) 福本友祐, 木村貴光, 森康維: 交流電場静電微粒化法によるシリカ粒子の生成, 第6回微粒化シンポジウム講演論文集, (1997, 神戸) 1-4

特許一言メモ No.164

特許電子図書館の創設

1998年度補正予算案に, 特許庁が保有する約4,000万件の特許情報をインターネットを通じて無料で提供する「特許電子図書館」の創設など, ベンチャー企業の育成を狙いとしたベンチャー対策費が1,039億円盛り込まれた。

特許電子図書館が提供する情報は明治以来の特許, 実用新案, 意匠, 商標などで, 「世界最大の

特許情報データベース」(特許庁) になるという。98年度内に提供を始める予定だ。特許情報の活用で, ベンチャー企業は事業展開を考える分野の出願動向や技術開発の現状を把握でき, 先を行く研究に集中できるほか, 特許情報をインターネットで世界に発信し, 国際展開もしやすくなるという。
(朝日 10.5.12より)

廃プラスチックのリサイクルの 現状および分離・選別技術

寺下敬次郎*

Keijirou Terashita

1. はじめに

容器包装に係る分別収集及び再商品化の促進等に関する法律（以下、容器包装リサイクル法と記す）は1997年4月より施行され、ガラスびん・PETボトル〔金属缶（アルミ、スチール）・飲料用紙パック〕を対象に分別収集と再商品化が始まっている。2000年4月からはPETボトル以外のプラスチック製容器包装ならびに飲料用パック以外の紙製容器包装が加わり、さらに中小企業の猶予が解除されて特定事業者の対象となることから、容器包装リサイクル法が完全に施行されることになる。

容器包装リサイクル法において廃棄物は、まず、原材料として利用できるマテリアル・リサイクルを行い、困難な場合はケミカルリサイクルにより対応し、さらに不可能であればサーマルリサイクルを検討することになっている。すなわち、循環型社会の構築である。

マテリアルリサイクルにおいて重要なことは、分別排出・分別収集の徹底に加えて、リサイクルする廃プラスチックなどの厳密な分離・選別である。つまり元の原料と同等な機能を持つリサイクル品を一定品質で恒常的に製造するキーポイントは分離・選別技術と言っても過言ではない。

ここでは、廃プラスチックのマテリアルリサイクルの現状をごく簡単に紹介するとともに、最近のプラスチックの分離・選別技術について述べる。

2. プラスチックの生産量およびマテリアルリサイクルの現状

2.1 生産量とリサイクル率

プラスチックは、軽くて強い、成形しやすい、水分やガスを通さない、錆びにくく腐りにくい、透明性や電気絶縁性に優れている、などの特徴と機能を持っている。そのため容器・包装材料、家電製品、自動車、日用品などの広範囲に利用されてきた。しかし、役割を終えると、当然のことながら廃棄物となる。廃棄物になったプラスチックはその長所が一転して、かさばる、腐らないなど処理・処分する上で短所になり、ごみの中でも「厄介もの」と取り扱われる。したがって、廃プラスチックは廃棄物処理の大きな問題であることから、排出量の抑制に加えてリサイクルに取り組まなければならない。すなわち、資源循環型社会の実現が急務である。

プラスチック廃棄物のリサイクル、有効利用、処理などの研究・開発を促進する社団法人として、プラスチック処理促進協議会が1971年に設立された。この処理促進協議会は、発泡スチロール再資源化協会、発泡スチレンシート工業会、PETボトル協議会、塩化ビニルリサイクル推進

*大阪府立大学工学部 化学工学科
(〒599-8531 大阪府堺市学園町1-1)
TEL:0722-54-9305 FAX:0722-56-0019

協議会および日本プラスチック工業連盟より構成されている。さらにプラスチックリサイクリング学会やプラスチック化学リサイクル研究会が活発に研究・情報活動を行っている。

さて、プラスチック処理促進協議会では、廃プラスチックの量をFig. 1に示すように推定している¹⁾。

家庭から排出される一般廃棄物と事業所からの産業廃棄物を合わせた廃プラスチックは、日本全体で約884万トンである。その内327万トン(約37%)が単純焼却、366万トン(約38%)が埋立、95万トン(約11%)がマテリアルリサイクルされ、再生原料や再生加工品になっている。また焼却処理のうち、122万トン(約14%)は発電エネルギーとしてサーマルリサイクルされていると推定されている。これらの結果から、221万トン(約25%)が有効利用されていることになる。しかしながら、スチール缶の約70%、アルミ缶の60%程度に比べると低く、今後さらにリサイクル率を向上させなければならない。

2.2. 廃プラスチックのマテリアルリサイクルの現状

2000年4月より完全施行される容器リサイクル法において、「その他のプラスチック製容器包装」

にはTable 1に示すようなものがある。同表には「その他の紙製容器包装」も参考に示した。表1に示した廃プラスチックを再商品化しなければならないから、分別排出・分別収集・再商品化のリサイクルシステムの構築が極めて重要になる。

Table 1 その他のプラスチック、その他の紙に分類される容器包装の例

(その他のプラスチック)

容器：食品トレイ、レジ袋、弁当やカップラーメンの容器、卵パック等の食品パッケージ、シャンプー/洗剤/油のボトル、家電製品の梱包剤(発泡スチロールの仕切材)、コーヒーフレッシュの容器

包装：菓子の外装フィルム、たばこ箱の外装フィルム、家電製品の緩衝用シート、果物用のネット状の包装

(その他の紙)

容器：お菓子の紙箱、たばこの紙箱、化粧品、薬の紙箱、文房具の紙箱、衣料の紙箱、電化製品の紙箱、アルミ付き飲料用パック、ストローの袋

包装：お菓子の包み紙、百貨店の包装等各種包装紙

マテリアルリサイクルは最終処分(埋立)量の削減、資源の有効利用の立場から考えた場合、最も望ましい方法と考えられる。Fig. 2にプラスチックの再生プロセスと製品の一例²⁾を示した。廃プラスチックを分別収集・前処理(洗浄・破砕)・溶融・成形加工し、再商品化が行われていることがわかる。しかしリサイクル率はプラスチック総排出量の11%程度である。この数値はこ

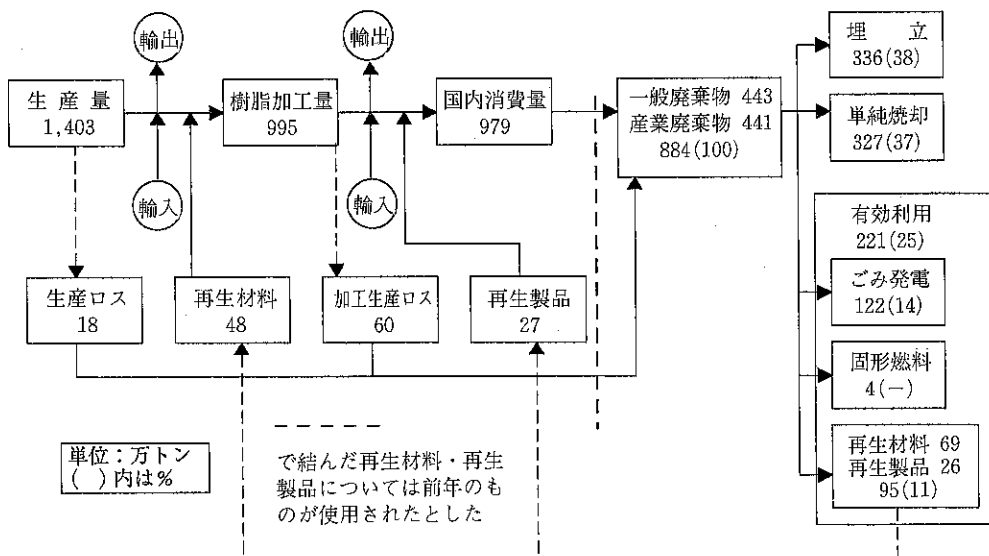


Fig. 1 プラスチック製品・廃棄物・再資源化フロー (1995年)

ここ数年大きな進展は見られないが、容器包装リサイクル法の完全施行などの社会変化により、今後リサイクル率は上昇すると考えられる。これまでリサイクル率が低かったのは、収集・輸送・選別・再処理にかかわるコストが高くつくことに加えて、再使用や再生材料使用の用途がみつからなかったことが要因であると解釈される。このことはリサイクルプロセスで新たなエネルギーを投入しなければならないことを意味する。すなわち、再生のために消費されるエネルギーが、バージン材で新規の製品を製造するのに比較して大きいことによる。

2.2.1 廃プラスチックの高炉原料化技術

廃プラスチックの再生原料化に期待されているのが、高炉原料化技術である。そのリサイクル技術の概略をFig. 3に示す³⁾。本システムは廃プラスチックの破碎・造粒、吹き込み施設から構成されている。PVC以外の樹脂は、形態別にフィルム系、固形系の2系統に加工される。フィルム系廃プラスチックは溶融造粒機内で摩擦熱により溶融された後、急冷され、高炉吹き込みに適した粒度に整粒する。固形系廃プラスチックは、二軸破碎機などにより破碎され整粒される。2系統で加

工された粒子はサイロにいったん貯蔵された後、吹き込みタンクに移送される。さらに吹き込みタンクより空気とともに高炉羽口よりから吹き込む。

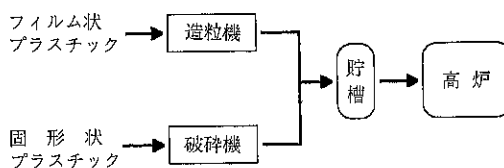


Fig.3 廃プラスチック高炉原料化システム

廃プラスチックはFig. 4に示す高炉レースウェイ内で燃焼・ガス化する³⁾。レースウェイ内には羽口より約200m/sの高速で約1,200℃の熱風が吹き込まれ、その前半で主にコークスが熱風中の酸素により急速燃焼し、温度は2,000℃以上の高温に達する。レースウェイ後半では酸素は消失し生成したCO₂は、コークスとの反応でCOの還元ガスとなり、鉄鉱石の還元利用される。吹き込まれた廃プラスチックは、主にこのレースウェイ後半部で急速にCOおよびH₂にガス化し、鉄鉱石の還元に寄与する。この高炉原料化設備は1996年10月より現在まで、問題なく順調に稼働しているという。

先述の技術は、PVCを取り除いた産業廃棄物系の廃プラスチックを高炉原料化するものである。

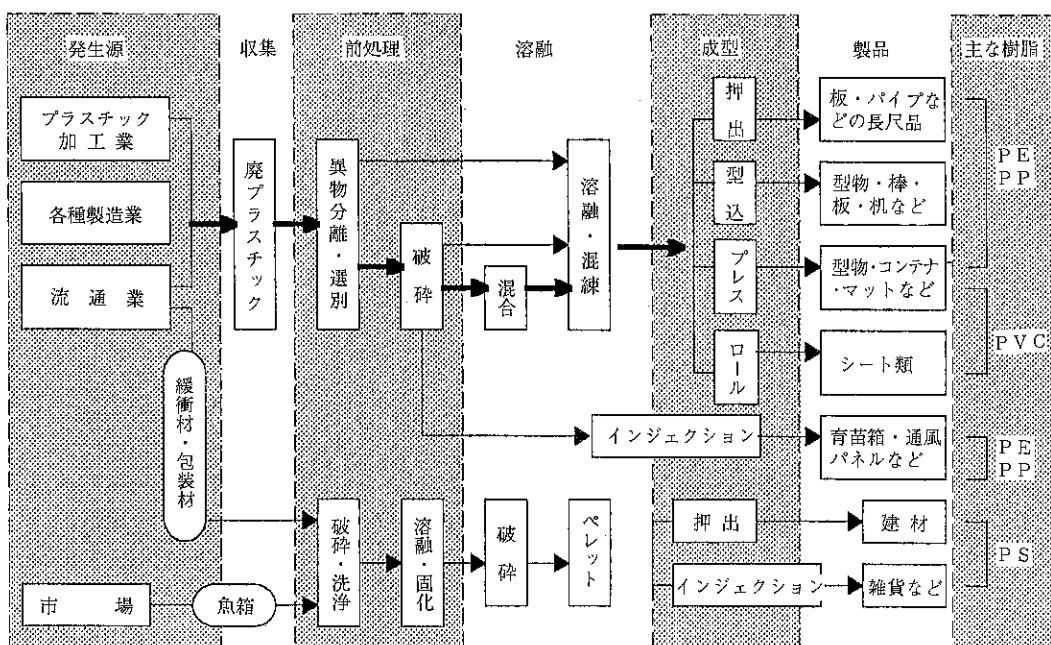


Fig.2 プラスチックの再生工程

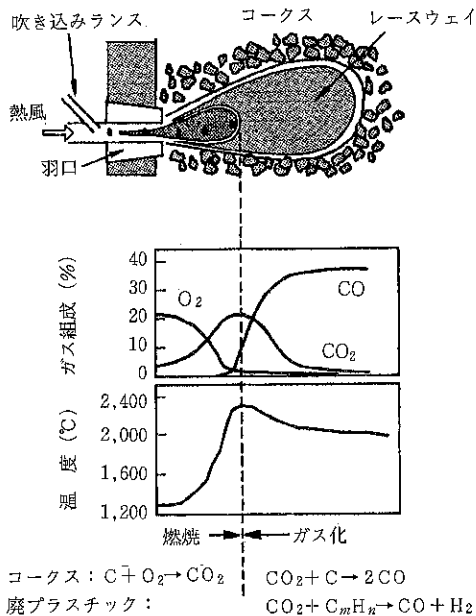


Fig.4 高炉下部レースウェイ概念図

る。しかし、最近、一般廃棄物系にも応用されようになったことが発表された。

2.2.2 発泡スチロールのリサイクル

発泡スチロールは、軽量性・保湿性・耐衝撃性・経済性に優れていることから、鮮魚用漁箱、果実箱、野菜箱などの容器類、家電製品・精密機器の緩衝用梱包材等に多く使用されている。しかし、ほとんどが一度の使用で廃棄物となる。さら

に廃発泡スチロールは、かさばる、軽くて取り扱い難い、ならびに安価であるために多量に使用されるなどの点から、廃棄物としての適正処理に多くの問題がある。しかし、2000年からの容器包装リサイクルの完全施行により、Table 1 に示すように分別収集と再商品化が行われることになる。

発泡スチロールの再資源化率は1996年現在で約29%であることから、多の樹脂に比べてリサイクル率が高い。Fig. 5 に用途別再資源化量を示す⁴⁾。ほとんどが輸出インゴットである。インゴットはアジア地域に輸出され、ペレット化、射出成形・押出成形により、品質が問題にならない容器類などの二次再生品に再利用されている。しかし、最近アジア地域の経済不況によりインゴットの輸出が急減していることから、新たな再商品化の活路が求められている。

最近、再資源化量を増加させるために、再び発泡ポリスチレンとして使用するマテリアルリサイクルに関する開発・研究が活発である。廃発泡スチロールを柑橘類の溶剤（d-リモネン）などにて溶解（減容）し^{5,6)}、その後蒸発・分離器により溶剤と樹脂に分離することにより、再生ペレットを製造する方法が注目されている（Fig. 6⁵⁾）。この方法で減容する場合、熱を加えないことから、再生されるポリスチレンの品質が優れていることが特徴がある。

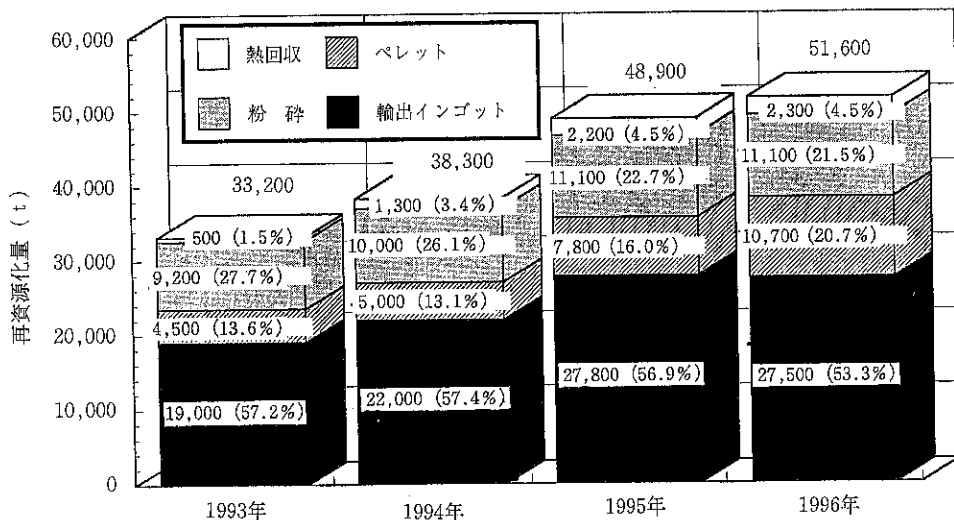


Fig.5 発泡スチロール用途別再資源化量

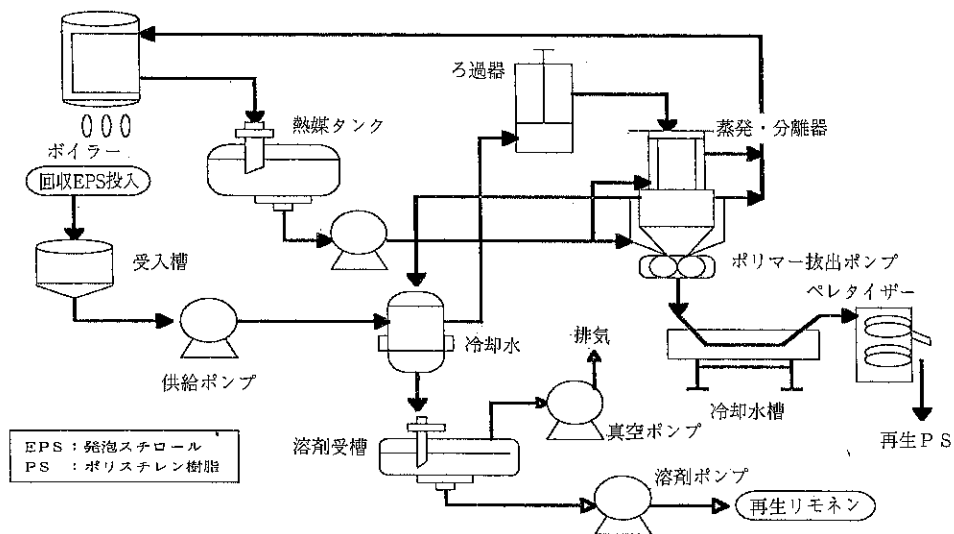


Fig.6 再生プラント構成図

3. プラスチックの分離・選別技術

3.1 分別・選別技術の概略

プラスチックを分離・選別するには、プラスチックと他の材質、あるいは樹脂の種類（素材）を分けるなどの条件によって採用する選別方法が当然異なる。方法は乾式と湿式に大別され、電気的、機械的、赤外線およびX線などを用いた技術が開発されている。その分離・選別方法をまとめてTable 2に示す。

一般に乾式の分離・選別装置はプラスチックの素材別の分離よりも、プラスチックとそれ以外の異物（金属、木片など）の分離、あるいは形状分離などに採用されている。一方、湿式分離では浮

沈方法が古くから利用されているが、プラスチック選別のための構造や操作方法などに対する定量的な情報が不足していることに加えて、技術的にも開発しなければならない点が多い。特に湿式分離・選別の場合は、分離精度に加えて脱水・乾燥が必要であることから、経済性に問題が生じる。

さてTable 2より、プラスチック（PET）ボトルのリサイクルには光学的選別方法が採用されていることがわかる。欧米ではX線によりPVCボトルの分離・選別が行われ、我が国のPETボトルのリサイクル工場にも導入され稼働している。日本では最近、近赤外線を用いたプラスチックボトルの分離・選別装置が数社より開発され、その性能と特徴が発表されてきた⁷⁻⁹⁾。これらの選別装置

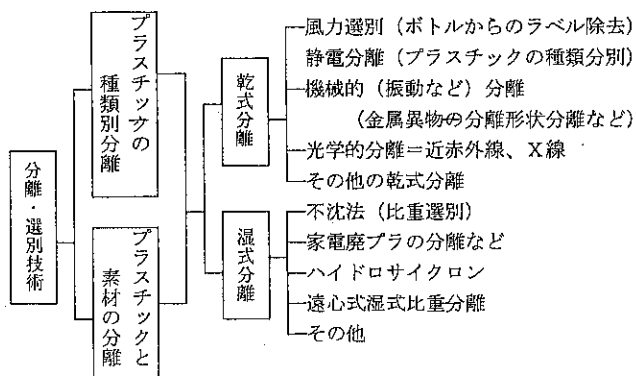
技術には大差はないと考えられるが、選別精度とハンドリングに幾分問題があることから、各社が特徴を持たせているようである。この点については後述する。

3.2 廃プラスチック（PET）ボトルの選別

3.2.1 PETボトルの再生プロセス

1997年4月「容器包装リサイクル法」が施行されて、対象品目であるPETボトルの分別収集に加えて再商品化が

Table 2 プラスチックの分離・選別技術



本格的に開始された。その再商品化プロセスの概略を以下に示す。

- ①自治体などにより収集されたPETボトルを引き取り、再生工場へ搬送する。
- ②X線によりPVCボトルを分離する。
- ③カラーボトルの分離（着色ボトルと異物を除去する。）
- ④分離した透明ボトルを、一定の大きさに（約8mm角）粉砕する。
- ⑤粉砕されたPETフレークをアルカリ性洗浄液にて洗浄する。
- ⑥比重分離により異物を除去する（PP、PEは水に浮き、PETや金属などは沈む）。
- ⑦PETフレークを熱風乾燥させる。
- ⑧風力や重力法を利用して、ラベルおよび微粉末を除去する。
- ⑨静電気や金属探知器により、アルミニウム・金属粉などを除去する。

以上のプロセスを経て、フレーク状で純度の高いPET樹脂が再生品として製造されることになる。

PETボトルのリサイクルは我が国はもちろん欧米においても行われているが、リサイクル技術において重要なことは、上記のようにPVCボトルや他の不純物（金属、紙類など）を、いかに精度よく効率的に分離・選別かである。すなわち、リサイクルは分離・選別技術であると捉えることができる。

現在、廃プラスチックボトル分離技術としてX線方式、近赤外線方式およびレーザ方式があるが、まだ十分でないことから、各方式を重複させ

て検知しているようである。

3.2.2 廃プラスチックボトルの自動識別・分別システム

アメリカで稼働している廃プラスチックボトルの自動識別・分別（分離）システムを用いて、PETボトルの識別・分離実験を行った筆者らの成果¹⁰⁾の一部を紹介する。自動識別・分別システムの概略をFig.7に示す。本装置は投入ホッパ付き傾斜コンベア部、単列および個別搬送部、計測部、選別部、電気操作制御板から構成される。ホッパへ投入された廃プラスチックボトル群は、傾斜付きコンベアにより切り出され、単列および個別搬送コンベア部へ搬送される。ここで、ボトルの向きが整えられてから、計測部にて材質・色が検知される。選別部では計測データからエアノズルにより所定位置で選別処理する。本装置は排出口がPVC製ボトル専用排出口を含めて4ヶ所ある。内3ヶ所は選別操作条件により材質・色等を任意に設定できる。本実験では排出口1：透明PET、排出口2：緑色PET、排出口3をPEおよびPPボトルにそれぞれ設定されている。また電気操作制御板には、それぞれの種類のボトルが何本検知されたかが表示される。

Fig.8に計測部構成を示す。材質検知用赤外光センサ、PVC検知用X線センサ、ボトル色検知用CCDカメラおよびセンサ受信部／制御部から構成されている。

搬送されてきたボトルは、まずX線センサによって、PVCボトルが識別・除去される。PVCは塩素基が含まれていることから、それ以外のプラ

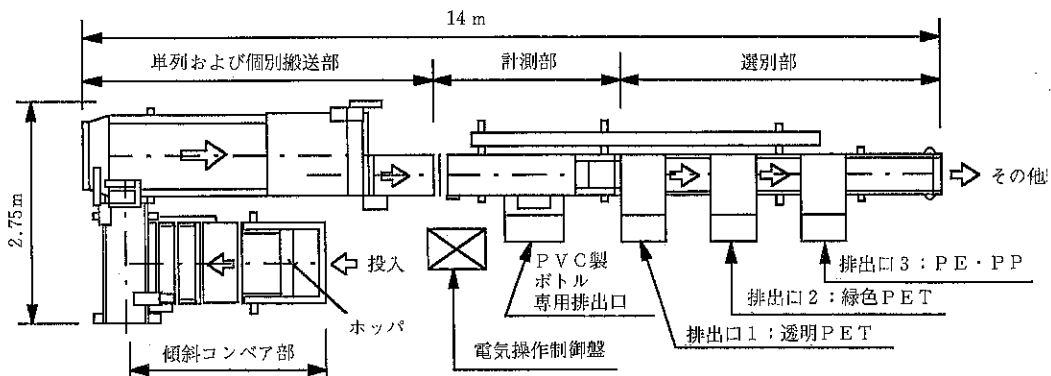


Fig.7 廃プラスチックボトルの自動識別・分別システムの概略

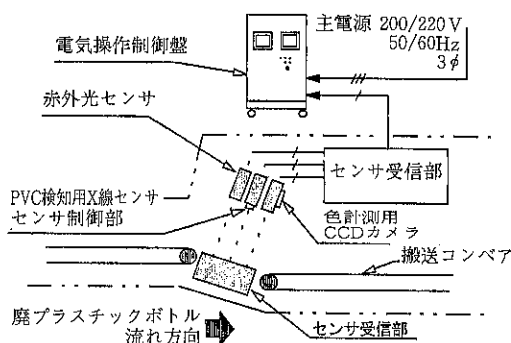


Fig. 8 計測部の概略

スチックに比べて照射されたX線の透過時減衰量が大きい(2~3倍)ことを利用して選別されるようになっている。また赤外光センサでは、近赤外線吸収率の違いによりPET, PE, PPが識別できる。さらに、CCDカメラで色選別される。

検知可能な材質は塩化ビニル (PVC), ポリエチレンテレフタレート (PET), 緑色PET, ポリエチレン (PE), ポリプロピレン (PP) の5種類である。色選別操作に関しては、選別基準色として7色 (例: 赤, オレンジ, 緑, 青, 黄, 白, 黒等) まで登録可能である。

Fig. 9 に透明PETおよびPVCボトルの識別・分別 (選別) 結果が示されている。Fig. 9(a) から透明PETに他種類のボトルが3割程度入っている場合は、純度100%, 回収率94.3%と、良い精度で透明PETボトルが分別されている。特に除去しなければならないPVCの検知率および回収率は100%であることがわかる。さらに透明PETに他種類のボトルが5割を混ぜた条件では、Fig.

9(b)のように純度および回収率が多少悪くなっている。これは透明PET以外のボトルが多量に投入されたことにより、検知が複雑になると共に、ハンドリング上の問題によって生じたと考えられる。検知・識別が比較的容易であるのに対して、ハンドリングが困難であることは分離 (分別) において共通する問題点でもある。

廃プラスチックの識別・分離に関する基礎的研究を行った結果、以下のようなことがわかっている¹⁰⁾。

- (1) 透明PETボトルに3割の他種類のボトルが混入している条件においては、透明PETボトルを純度100%識別・分離できる。PVCボトルはX線センサを採用することにより、PETボトル類から完全に分離できることを確認した。またCCDカメラにより100%の純度でPETボトルの色選別ができる。さらにキャップの有無に関係なく識別・分別できる。
- (2) 透明PETボトルに5割程度他種類のボトルが混入している場合には、識別・選別された透明PETボトル内に1.3%程度他種類のボトルが混ざっていた。したがって、分別排出・分別収集された透明PETボトル内に他種類のボトルが混入する割合は3割以下にすることが望まれる。そのためには自治体の啓発活動と住民の協力が不可欠である。住民の意識改革がPETボトルのリサイクルを、成功させるキーとなる。
- (3) 近赤外線は透過力が弱いのでPETボトルの透明部分が少なく検知しにくくなると考えられることから、透明PETボトルの検知面積を調べた。その結果、約8cm幅の透明部分があれば正しく識別できることが確認した。したがってラベル等で全部覆われているボトルは、正しく分離できないことになる。

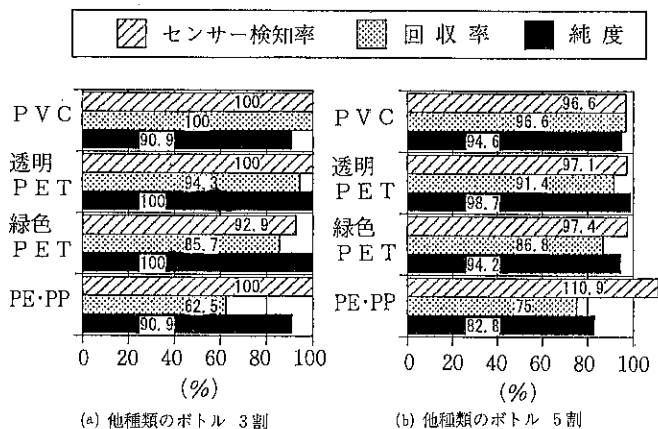


Fig. 9 識別・分別結果

れることから、透明PETボトルの検知面積を調べた。その結果、約8cm幅の透明部分があれば正しく識別できることが確認した。したがってラベル等で全部覆われているボトルは、正しく分離できないことになる。

- (4) 近赤外線は水分によって吸収されるために、飲料水の飲み残しや洗浄後の乾燥不足などによる水分の影響を検討した。その結果100ml以上水分が入っているボトルは識別できなかった。しかし飲料水が

少量 (50ml以下) 残っていたり、洗浄により水滴が付いている程度なら正しく識別・選別できることを検証した。

- (5) 透明PETボトル内に内容物が残っている場合 (50ml以下)、ソースのように粘性が大きい内容物が付着しているボトルは正しく検知されないことから、透明PETボトル内に混入することはない。PETボトルのリサイクルプロセスで洗浄するときの負担を考慮すると、PETボトルに識別・選別されない方が良く考えられる。なお、本装置の処理能力は8,000~10,000本/時間である。

一般系廃棄物であるプラスチックボトル・ガラスびん・缶がそれぞれ確実に分別排出・分別収集されるとは限らない。このような場合でも、各資源を高速・高純度で自動選別できる装置が開発されている。その装置のシステムフローをFig.10に示す⁸⁾。各資源に対する選別の基本は、近赤外分光法による材質識別、色識別、風力選別および金属検出である。具体的には、一次選別として風力選別 (ガラスびんとその他) を採用し、ガラスびんをRGB分光方式+形状確認方式により選別する。プラスチックボトルについては近赤外分光方式、アルミ缶は渦電流方式および鉄缶はマグネットコンベア方式により、それぞれ選別するようになっている。処理量はガラスびん=最大4t/h、缶=最大0.7t/h、プラスチックボトル最大0.2t/hであるという。しかし、各資源が複雑に混在している状態では選別精度が幾分低下すると推察される。この装置の特徴の一つは、認識後の選別プロ

セスにおいて空気圧を採用していないことから、操作時は以外と静かであることが挙げられる。

3.2.3 発泡トレーの識別

2000年4月より完全施行される容器包装リサイクル法では、当然のことながら発泡 (食品) トレーが含まれる。最近、容器包装廃棄物中に食品トレーの占める割合が多くなっているか、ごみ組成分析結果よりわかっている。ここでは、近赤外反射型分光分析装置を用いた発泡 (食品) トレーの識別結果を、ごく簡単に紹介する。

数種類の発泡トレーを対象として、吸光度スペクトルを測定している結果の一例をFig.11に示す¹¹⁾。茶色や青色の模様がついているトレーは、スペクトルに殆ど変化がないことから識別できる。つまり選別することが可能。しかし、黒色トレーあるいはアルミニウムとの複合トレーでは、スペクトルが異なっていることから識別できない、ことが報告されている。なお、黄色および青

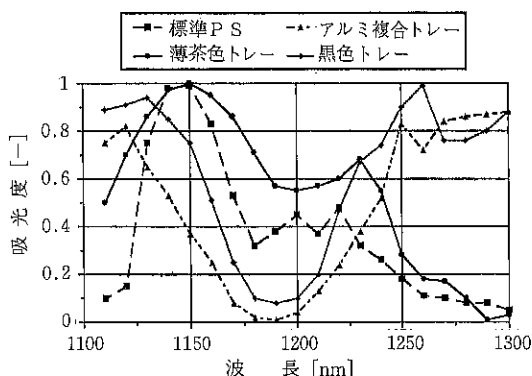


Fig.11 発泡トレー等の識別

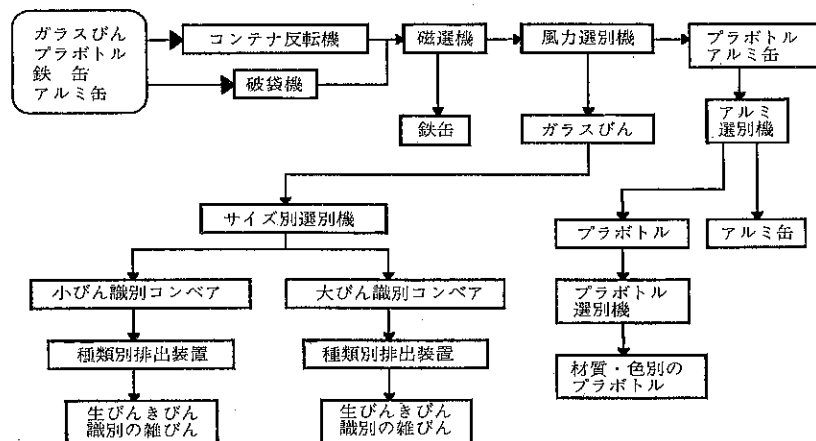


Fig.10 システムフロー

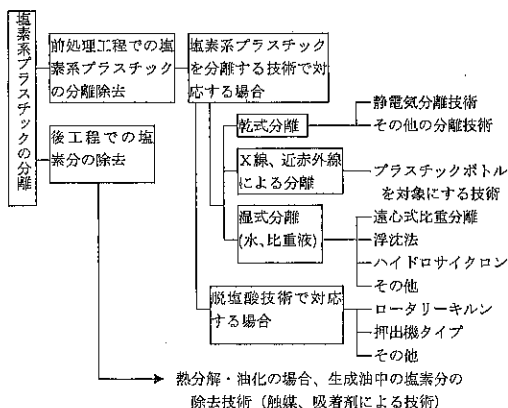
色に着色した不透明なボトルやカップ・パックについては問題無く識別できることが指摘されている¹¹⁾。

3.4 塩素系プラスチックの分離選別技術

3.4.1 廃プラスチックからのPVCフィルの選別

マテリアルリサイクルは勿論のこと、ケミカルリサイクルにおいて重要なことは、塩素系プラスチックの分離選別である。その分離・選別技術をTable 3に示す。方法は前処理プロセスで塩素系プラスチックを選別除去する、脱塩酸して処理する2方法に大別される。前者の分離・選別は基本的にTable 2に示した方法と類似である。いずれの方法を採用するかは、目的および後工程の技術と対応させて検討しなければならない。技術の経済性が重要であり、特に脱塩酸した場合、塩酸を中和処理するか、塩酸水として回収するかによって付帯設備の選定が異なる。

Table 3 塩素系プラスチックの分離・選別処理技術



3.4.2 廃プラスチックからのPVCの選別

2000年4月から「その他のプラスチック」の再商品化が完全施行することになるが、それに伴いPVCの分離・選別が重要な課題である。ここでは最近のPVCの分離・選別技術を静電気分離と近赤外線方式に注目して述べる。

静電気選別は渦電流選別と同様に電気的選別の一種である。静電気選別では主に試料表面の電気伝導性の差を利用し、一方、渦電流選別はバルクの物性としての電気伝導性により選別する方法である。帯電させるには静電誘導や摩擦帯電などを

利用する方法がある。

プラスチックの選別に摩擦帯電による静電分離に注目した研究が報告されている。その摩擦静電分別装置の概略をFig. 12に示す¹²⁾。この方法は摩擦帯電を利用した電界自由落方式である。攪拌機などで摩擦帯電された試料は、その帯電性に応じて、接地電極または負電極に引き寄せられ、回収容器内の接地極ゾーンまたは負極ゾーンに落下し、分別される。無帯電もしくは微弱帯電の試料は中間ゾーンに落下するようになっている。

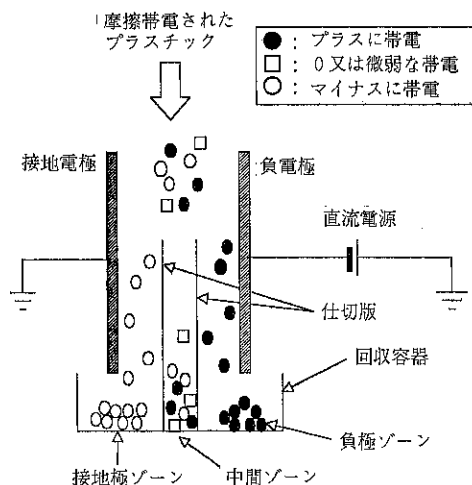


Fig.12 摩擦静電分別装置の概略

下記にプラスチックの摩擦帯電序列の一例を示す。

(正) PA-PS-PE-PP-PET-PVC (負)

例えばPSとPVCが摩擦された場合には、PSが正、PVCは負にそれぞれ帯電することから、混合物中よりPVCを分別することができる。3種以上の混合物の分別は一般的に困難であるが、序列の右端にあるPVCは、他のプラスチックとの摩擦で常に負に帯電するので、混合物中からも例外的に分別されることになる。ただし、摩擦帯電序列はプラスチックの添加物（顔料、添加剤など）によって変化するかとから、分離精度が低下することが指摘されている¹²⁾。したがって、正確な分離にはそれなりの工夫が必要である。

回転ドラム電極接触式の静電分離装置の概略をFig. 13に示す。この装置は印加電圧の低減と装置の小型化を目的として開発された¹³⁾。回転ドラム電極接触式では、分離対象物をドラム上に供給

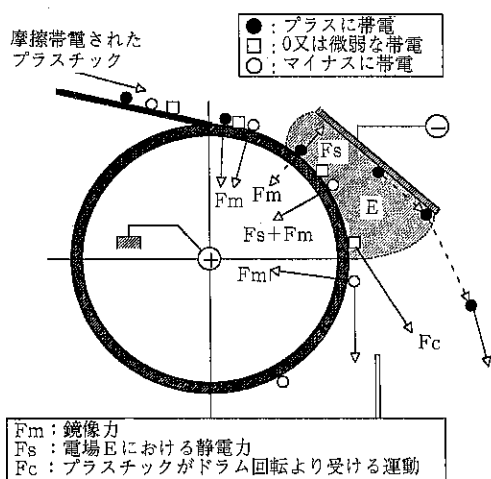


Fig. 13 回転ドラム電極接触式装置の概略

し、ドラムと同符号帯電プラスチックが遠心力によってドラムから離れる際にクーロン力を付与して分離性を高める。ドラムの電極に接触した状態で搬送されるために電極間距離は数cmと短く、印加電圧が低くても十分な分離精度が得られる。装置の小型化は特に高さ方向である。回転ドラム電極は金属製で接地極となる。また対抗電極は板状で設置位置（角度、極間距離）は対象物や回転数によって決定される。

水洗処理を行った2種類の廃プラスチック（農業用プラスチックおよび分別収集プラスチック）の分離試験結果から、実験室レベルでは十分な分離性能が得られている¹³⁾。

Fig. 14には近赤外線方式を採用したPVCフィルムの選別装置の一例を示す¹⁴⁾。本装置はフィルム

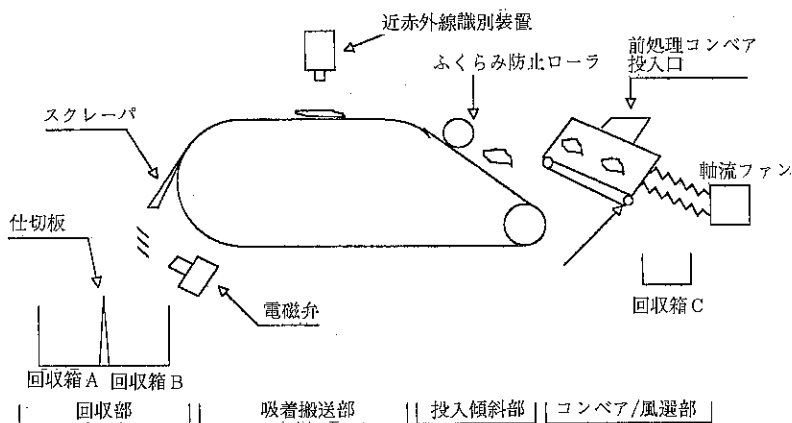


Fig. 14 PVCフィルム選別装置及び前処理装置概略

などを供給する「投入傾斜部」、供給されたフィルムを近赤外線識別装置まで搬送する「吸着搬送部」、近赤外線センサにより検出されたPVCフィルムとそれ以外の材質フィルムを仕分けし、それぞれを回収する「回収部」より構成されている。ここで近赤外線識別装置により、PVCフィルムと判定された場合、回収部までの搬送時間分のラグタイム後に電磁弁の動作開始から終了までの総時間の間、圧縮空気を斜め上方に噴出することで、PVCフィルムをスクレーパに移動する前に吹き飛ばし、回収箱Aに回収する方法で分離している。性能試験結果は、PVC以外のフィルム純度：98.2wt%、PVC以外のフィルム回収率：94.3wt%、PVCフィルム純度：59.0wt%、PVCフィルム回収率：84.9wt%である。ケミカルリサイクル用に要求されるPVCの含有率0.5wt%を、現段階では達成できなかったと報告している¹⁴⁾。

エアーティブル方式を採用して、粉碎プラスチック（PVC、PE）の混合物中からPVCを分離する方法が検討されている¹⁵⁾。当初15%であったプラスチック混合物中のPVC含有率を、デッキの傾斜角：6度、空気流速：0.92m/s、振動数：6.8Hzに設定することにより、0.4%に低減できたと報告している。

Fig. 15¹⁶⁾は筆者らがPVCの自動検知・選別実験を行っているセンサ類の構成概要を示したものである。廃プラスチックよりPVCを検知（識別）・分離するために、透過式X線センサおよび反射式近赤外線センサが採用されている。このように2種類のセンサを用いることにより、廃プラスチック

中から検知もれを無くし高精度でしかも高速でPVCを分離することができる。本装置の詳細な性能試験については現在研究中であるので、近く学会などで発表することになっている。

4. おわりに

2000年4月の「容器包装リサイクル法」の完全施行にともない廃プラス

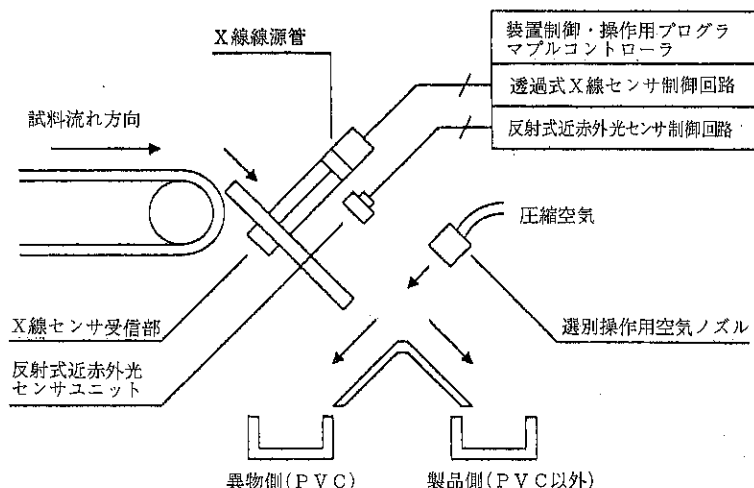


Fig.15 センサ構成概要

チックの分離・選別技術の蓄積が不可欠であることは、改めて説明するまでもない。そこで本稿では、廃プラスチックのリサイクルの鍵を握る分離・選別技術に注目し、最近の現状と動向を廃棄物学会の報告を骨子にして紹介した。

21世紀において良好な自然環境を保持するためには、膨大な量と体積を占める廃プラスチックをマテリアル、ケミカルおよびエネルギーリサイクルを適切に組み合わせ、活用することである。リサイクル過程では、多くの環境負荷に加えて経費を必要とすることから、より優れた装置とシステムの確立が重要である。マテリアルリサイクルにおいては分離・選別・ハンドリング装置と技術の開発が望まれる。サーマルリサイクルについては、エネルギー回収技術の向上、ダイオキシンの抑制、煤塵中の有害物質の除去などを、いかに低価格で効率よく行うかが、重要な課題であろう。

引用文献

- 1) プラスチック処理促進協議会編：プラスチックリサイクルの基礎知識，(1996)
- 2) プラスチック処理促進協議会編：プラスチック—その処理と資源化を考える—，(1997)
- 3) 藤井益弘，根本謙一，関根真也：燃料及燃焼，64，p. 723 (1997)
- 4) 発泡スチロール再資源化協会：JEPSAR INFORMAION 1997
- 5) ソニー株式会社：発泡スチロール高品質リサ

イクルシステム資料，(1997)

- 6) 来住宜剛，寺下敬次郎，宮南 啓：第9回廃棄物学会研究発表講演論文集Ⅰ，p. 283 (1998)
- 7) 米田健一，平林 漸，米澤富任，木村真康：第7回廃棄物学会研究発表講演論文集Ⅰ，p. 368 (1996)
- 8) 木谷勝一，林慶一郎，竹井恵子，山科光宏：第9回廃棄物学会研究発表講演論文集Ⅰ，p. 289 (1998)
- 9) 小川 斉，土田俊彦，戸田隆司：第9回廃棄物学会研究発表講演論文集Ⅰ，p. 296 (1998)
- 10) 九良祐一，寺下敬次郎，宮南 啓：第8回廃棄物学会研究発表講演論文集Ⅰ，p. 260 (1997)
- 11) 代田 寧，牧野 宏，桜井敏郎，米田健一，平林 漸：第9回廃棄物学会研究発表講演論文集Ⅰ，p. 299 (1998)
- 12) 石橋 博，森 範宏，松下康志，染谷太郎：第7回廃棄物学会研究発表講演論文集Ⅰ，p. 372 (1996)
- 13) 塚原正徳，井上鉄也，前畑英彦，東條千秋：第9回廃棄物学会研究発表講演論文集Ⅰ，p. 308 (1998)
- 14) 米田健一，米澤富任，木村真康，田中千草，平林 漸：第9回廃棄物学会研究発表講演論文集Ⅰ，p. 292 (1998)
- 15) 大井英節，綱島 群：第9回廃棄物学会研究発表講演論文集Ⅰ，p. 305 (1998)
- 16) 寺下敬次郎，杉本伸一，宮南 啓：未発表

廃棄物管理と粉体工学

宮南 啓*

Kei Miyanami

1. はじめに

平成5年度の統計によると、一般廃棄物の排出量は年間5千万トンを超え、また、その8倍もの産業廃棄物が排出されている。生活様式の多様化と経済活動の進展・拡大に伴い、廃棄物は量のみならず、その質までも多様化してきている。こうした中で、最終処分場のひっ迫と新規立地難や産業廃棄物の不法投棄とそれらによる環境汚染など、様々な問題が多発している。21世紀に向けて地球環境の保全と限られた資源の有効活用は必須の課題である。環境基本法に基づき、平成6年末に閣議決定された環境基本計画によれば、廃棄物・リサイクル対策の考え方として；

- (1) 廃棄物の発生抑制（いわゆる発生抑制）
- (2) 使用済み製品の再使用（reuse）
- (3) 回収されたものを原材料として利用するリサイクル（recycling and reclamation）
- (4) 以上の3項目が「技術的な困難性、環境への負荷の程度の観点から適切でない場合」、環境保全に万全を期して、エネルギーとしての利用を推進する

とともに、最後に発生した廃棄物については適正な処理を行うことが述べられている。

一方、ひっ迫する最終処分場問題と不法投棄問

題に対処するため、最近、「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」が改正され、①廃棄物の再利用促進のための事業者認定制度②最終処分場の設置手続きの明確化③不法投棄に対する罰則の強化とマニフェスト制度の適用拡大などが付け加えられた。

いずれにしても、廃棄物の処理・リサイクルおよび処分は法体制の下に管理されている。ここでは、容器包装リサイクル法を中心に、そのような法体制の概略を解説するとともに、関連する種々のリサイクル技術の中で粉体工学が中心的な役割を担うものについて、事例を紹介しながら概説する。

2. 廃棄物の取り扱いに関連する基本的な法律

廃棄物の処理・リサイクルおよび処分は法体制の下に管理されている。表1は関連する基本的な法律を列挙して示したものである。

2.1 廃棄物の定義

廃棄物処理法によれば、「廃棄物」は次のように定義されている：

占有者が自ら利用し、または他人に有償で売却することができないために不要となった固形状または液状の物をいう。

自ら利用とは、他人に有償で売却できる性状の物を占有者が使用することをいう。他人に有償売却できないものを排出者が使用することは、自ら

*大阪府立大学工学部 化学工学科
(〒599-8531 大阪府堺市学園町1-1)
Tel. (0722) 54-9303(ダイヤルイン)
Fax. (0722) 56-0019

表1 廃棄物に関連する基本的な法律

環境基本法 (平成5年11月19日法律第91号) 従来の環境行政では、公害を規制する公害対策基本法が中心となっていたが、1992年6月の地球サミットで採択された「地球と開発に関するリオデジャネイロ宣言」の趣旨を国内法に取り入れるためのものである。全46条から成り立ち、3章に分かれている： ①総則：地球環境保全の必要性に対する認識や持続可能な開発、国際協調といった基本理念のほか、国、地方公共団体、事業者、国民の果たす役割について定めている。 ②環境の保全に関する基本的施策：事業活動のあらゆる段階において環境配慮を行うことを求め、事業活動によって生じる廃棄物、煙、汚水等に起因する公害を防止し、自然環境を適切に保全するための必要な措置を講じる。また、リサイクル可能な製品の開発、販売や包装等の簡素化に努めることを求めている。 ③以上の施策のため、環境基本計画をさだめることとしている。
廃棄物の処理及び清掃に関する法律 (昭和45年12月25日法律第137号) 廃棄物に関する基本法である。廃棄物処理法と略記する場合が多い。廃棄物の発生を抑え廃棄物を適正に処理することによって、生活環境を保全し公衆衛生を向上させることを立法の目的とする 廃棄物を一般廃棄物と産業廃棄物とに区分し、更に爆発性、感染性その他の人の健康または生活環境に係る被害を生じるおそれがある性状を有するものを、特別管理一般廃棄物、特別管理産業廃棄物とし、処理方法などを各々定めている。 産業廃棄物の処理責任は排出事業者自ら負うことを原則とし、自ら処理できない場合は、許可を有する処理業者に委託することができることを規定する。 また、産業廃棄物の収集、運搬、分別、再生、処分等についても細かく定められ、適正な処理（廃棄物を公衆衛生や生活環境の保全上支障が生じないよう処理すること）の推進が図られている。
再生資源の利用の促進に関する法律 (平成3年4月26日法律第48号) リサイクル法と略記される。 経済が発展し再生資源の発生量が増加する一方で、そのかなりの部分が利用されずに廃棄されている状況を改善し、資源の有効な利用の確保を図ることを目的としている。 特定の事業者あるいは特定の製品について主務大臣が再生資源の利用の促進に係る指導や助言をすることを定めている。 紙やガラス容器の製造業や建設業を営む者が特定事業者とされる一方、自動車、家電製品、通信機器等が第一種指定製品、アルミ缶、ポリ容器、ニッカド電池等が第二種指定製品、スラグ、石炭灰、建設工事に伴う土砂、コンクリート塊、アスファルト・コンクリート塊、木材等が指定副産物とされている。
容器包装に係る分別収集及び再商品化の促進等に関する法律 (平成7年6月16日法律第112号) 容器包装リサイクル法と略記される。 容器包装廃棄物の分別収集およびこれにより得られた分別収集基準適合物の再商品化を促進するための措置を講ずること等により、一般廃棄物の減量および再生資源の十分な利用等を通じて、廃棄物の適正な処理および資源の有効な利用の確保を図り、生活環境の保全および国民経済の健全な発展に寄与することが目的である。 消費者は分別収集に協力（分別排出）し、市町村は容器包装廃棄物の分別収集を行い、また、事業者は市町村が分別収集した容器包装廃棄物を自らまたは指定法人やリサイクル業者に委託して再商品化すること等が規定されている。

利用に該当しない。例えば、建設廃材を自ら利用すると称して土地造成を行っても、それが廃棄物である限り、廃棄物処理法が適用される。

廃棄物処理法にいう廃棄物に当たらないものとしては

- ① 土砂および専ら土地造成の目的となる土砂に準ずるもの
- ② 港湾、河川等の浚渫に伴って生ずる土砂その他これに準ずるもの
- ③ 漁業活動に伴って魚網にかかった水産動植物等であって、当該漁業活動を行った現場付近に

おいて排出したもの

- ④ 放射性物質およびこれによって汚染された物質

2.2 産業廃棄物と一般廃棄物

廃棄物処理法上、両者は区分されている：

*産業廃棄物

事業活動にともなって生じた廃棄物のうち、法令で定められた、燃えがら、汚でい、廃プラスチック類、廃酸、廃アルカリなど19種類のもをいう。詳しくは表2に示した。事業活動に

表2 産業廃棄物の種類

産業廃棄物名	内 容
燃 え 殻	事業活動に伴い生ずる石炭がら、灰かす、焼却残灰、炉清掃排出物等
汚 泥	工場廃水等の処理後に残る泥状のものおよび各種製造業の製造工程などにおいて生ずる泥状のもので、有機性および無機性のすべてのもの
廃 油	鉱物性油および動植物性油脂に係るすべての廃油、廃溶剤等
廃 酸	廃硫酸、廃塩酸、有機廃酸類をはじめとするすべての酸性廃液、中和処理した場合に生ずる沈でん物は汚泥と同様に扱う
廃 アル カ リ	廃ソーダ液をはじめとするすべてのアルカリ性廃液、中和処理した場合に生ずる沈でん物は汚泥と同様に扱う
廃プラスチック類	合成高分子系化合物に係る固形状および液状のすべての廃プラスチック類
紙 く ず	新聞業、出版業、製本業および印刷物加工品製造業に該当する企業の事業活動に伴って生ずる紙くず（古紙を含む）。ポリクロロネイティッドビフェニール（PCB）が塗布されている紙くず
木 く ず	建設業に該当する事業活動に伴って生ずる木くず（工作物の除去に伴って生じたものに限る）。木材・木製品製造業、家具製造業およびパルプ製造業に該当する事業活動に伴って生ずる木くずならびに木材の輸入を行っている総合商社、貿易商社等の輸入木材に係る木くず
繊維くず	繊維工業に該当する事業活動に伴って生ずる天然繊維くず（合成繊維は廃プラスチック類）
動植物性残さ	食料品・たばこ製造業、医薬品製造業および香料製造業に該当する事業活動において原料として使用した動物又は植物に係る不要物（固形状のもの）（魚市場、飲食店等から排出される動植物性残さまたは厨芥類は事業活動に伴って生じた一般廃棄物）
ゴ ム く ず	天然ゴムのくず（合成ゴムは廃プラスチック類）
金 属 く ず	鉄くず、空缶、スクラップ、ブリキ・トタンくず、箔くず、鉛管くず、銅線くず、鉄粉、バリ、切削くず、研磨くず、ドライ粉、半田かす、溶接かす
ガラスくず及び陶磁器くず	廃空瓶、板ガラスくず、アンプルロス、破損ガラス、ガラス繊維くず、カレットくず、ガラス粉、土器くず、陶器くず、磁器くず、耐火煉瓦くず、断熱煉瓦くず、石膏型
鋳 さ い	高炉・平炉・転炉・電気炉からの鋳さい（スラグ）、キューボラ溶鋳炉のノロ、ドロス・カラミ・スパイス、不良鋳石、粉炭かす、鋳じん、鑄物廃砂
建 設 廃 材	工作物の除去に伴って生じた各種廃材（もっぱら土地造成の目的となる土砂に準じたものを除く）
家 畜 ふ ん 尿	畜産農業に該当する事業活動に伴って生ずる家畜のふん尿
家 畜 の 死 体	畜産農業に該当する事業活動に伴って生ずる動物の死体
ば い じ ん	電気集塵機捕集ダスト、バグフィルター捕集ダスト、サイクロン捕集ダスト
法施行令第1条第13号に規定する産業廃棄物	産業廃棄物を処分するために処理したものであって、以上の産業廃棄物に該当しないもの。例えば有害汚泥のコンクリート固型物。

ともなって、とは民間の工場、商店、ビルなどの営利目的の事業活動に伴って排出されるものだけでなく、下水処理や水道事業などの公共の事業活動に伴って排出されるものも含まれる。これらの産業廃棄物の処理責任は、排出事業者にある。

なお、爆発性、毒性、感染性、その他の健康または生活環境に係る被害を生ずるおそれがある性状を有するものは「特別管理産業廃棄物」に指定され、処理に関して特別の配慮を払わなければならないことになっている。

*一般廃棄物

産業廃棄物以外の廃棄物はすべて一般廃棄物である。その主たるものは、地域住民の日常生活に伴って生じたゴミ、粗大ゴミ、し尿、浄化槽に係る汚でいなど、いわゆる「生活ゴミ」である。しかし、それ以外にも、事業活動によって生じた廃棄物のうち法令で定められた19種類以外の産業廃棄物として特定されなかったものも含まれる（いわゆる事業系一般廃棄物）。例えば、事務所から出される紙ゴミなどが典型例である。これらの一般廃棄物の処理責任は、当該廃棄物が発生する市町村にある。

なお、感染性一般廃棄物、家庭電気製品のPCBを含む部品、ゴミ焼却処理などに伴って発生するばいじんが「特別管理一般廃棄物」に指定されており、やはりその処理に際しては特別の配慮が要請されている。

以上をまとめると、廃棄物の区分は図1のようになる。

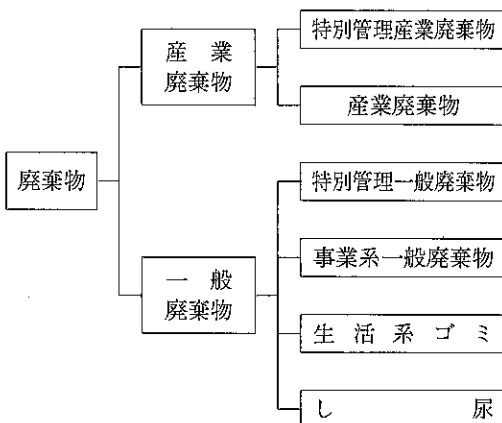


図1 廃棄物の区分

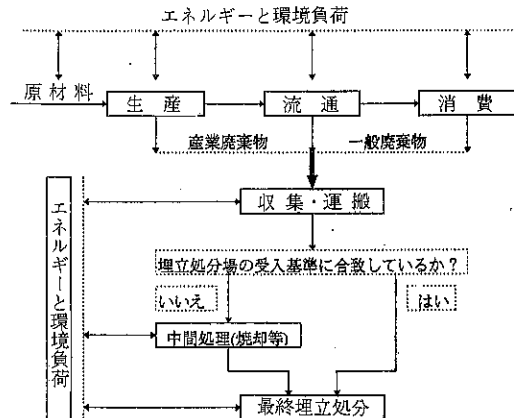


図2 廃棄物の処理・処分過程

2.3 廃棄物の処理

廃棄物は法の定めるところに従い、図2に示すような流れで処理および処分される。

*収集運搬

排出された場所から処理・処分する場所への運搬。

*中間処理

技術を駆使して、廃棄物を減量、減容、安定化、無害化、資源化することであり、粉体工学・粉体技術との関連が最も深い分野である。

*最終処分

生活環境の保全上支障の無い方法で、廃棄物を適正に貯留し、自然界の代謝機能を利用して安定化、無害化すること。

3. リサイクル法

この法律は、産業廃棄物等が対象になっており、通商産業省、建設省、農林水産省、大蔵省、厚生省、運輸省および環境庁の7官庁の管掌となっている。

同法では、再生資源の利用を総合的かつ計画的に推進するため、主務大臣が基本方針を策定・公表するとともに、再生資源の利用の促進を図るために必要に応じて特定業種、第一種指定製品、第二種指定製品および指定副産物の政令指定を行い、各事業者に対して、各事業所所管大臣が主務省令で定める判断基準または表示の標準に基づく取り組みを求めることができる旨規定されている。

3.1 特定業種

特定業種では、再生資源の原材料としてのリサ

イクル率を高めるため、事業者が再生資源利用計画を作成し、再生資源の利用率の向上、必要な設備の整備、技術の向上などに努めることが要求されている。なお、対象業種は、現在、次のとおりである：

- 1) 紙製造業(古紙の原材料としての利用を促進)
- 2) ガラス容器製造業(カレットの原材料としての利用を促進)
- 3) 建設業(土砂、コンクリートの塊またはアスファルト・コンクリートの塊の原材料としての利用を促進)

3.2 第一種指定製品

第一種指定製品では、製品が使用された後にリサイクルされることを促進するため、製造事業者に対して、製品の設計段階から事前評価を行い、材料の工夫、構造の工夫、分別に係る工夫などを行うことを、また、修理事業者に対しては、部品の交換の工夫などを行うことが、それぞれ求められている。現在、次のようなものが指定されている：

- 1) 自動車(製造事業および修理事業)
- 2) ユニット型エアコンディショナ、テレビ受像機、電気冷蔵庫および電気洗濯機(製造事業)
- 3) ニッカド電池を使用する機器である電動工具等16品目(製造事業)

3.3 第二種指定製品

分別収集を行う際の識別を可能とするような表示を行うことが義務づけられている。以下の製品が対象となっている：

- 1) 飲料用のスチール缶、アルミ缶
- 2) 飲料用、しょう油用のPETボトル
- 3) ニッカド電池

3.4 指定副産物

工場などで発生する副産物のリサイクルを促進するため、事業者は再生資源利用促進計画を作成し、規格・仕様に応じた加工、必要な設備の整備、技術の向上などに努めることが要求されている。対象副産物は次のとおりである：

- 1) 高炉による製鉄業および鉄鋼・製鋼・圧延業から発生するスラグ

- 2) 電気業から発生する石炭灰
- 3) 建設業から発生する土砂、コンクリート塊、アスファルト・コンクリート塊または木材

4. 容器包装リサイクル法

リサイクル法が産業廃棄物等を対象としているのに対して、容器包装リサイクル法は一般廃棄物に適用される。本法でいう「容器包装」とは、商品の容器および包装であって、商品が消費されたり商品と分離された場合に不用になるものをいい、瓶、缶、紙、プラスチック製のものなど、商品に付されたすべての容器包装のことである。なお、容器包装は「特定容器」(表3参照)とそれ以外の「特定包装」とに区別される。また、次のようなものは本法の容器包装には該当しない：

- 1) 「商品」以外のものに付されたもの(景品を包む紙袋、手紙やダイレクトメールを入れた封筒、家庭で付した容器や包装)
- 2) 役務(サービス)の提供に伴って付された容器包装(宅配業者が配送のために用いた箱、クリーニングのビニールカバー)
- 3) 産業廃棄物である容器包装(事業系一般廃棄物のうち、プラスチック類が相当するはず)

さて、容器包装リサイクル法では、容器包装廃棄物(容器包装が一般廃棄物になったもの)について、消費者、市町村および事業者がそれぞれの責任を分担するシステムになっている：

＊消費者：分別収集に協力する(分別排出)。

＊市町村：容器包装廃棄物の分別収集を行う。

＊事業者：市町村が分別収集した容器包装廃棄物を自らまたは指定法人やリサイクル業者に委託して「再商品化」する。

分別収集の対象品目は表4に示すように10分類となっており、そのうち7分類が平成9年度から実施されている。各市町村は「分別収集計画」を策定して都道府県知事に提出しているが、経費の行政負担増が懸念されている。

一方、分別収集された容器包装廃棄物が再商品化の対象になるためには、表5に掲げる基準に適合し、かつ、決められた場所(施設)に保管されていなければならない(分別基準適合物)。したがって、消費者と市町村においては、このような基準に適合するような排出、収集、また、必要

表3 容器包装リサイクル法の適用対象となる特定容器

分 類	形 態
1. 主として鋼製の容器	① 缶（カップ形のものを含む） ② ①に準ずる構造、形状等を有する容器 ③ 容器の栓、ふた、キャップその他これに類するもの
2. 主としてアルミニウム製の容器	① 缶（カップ形のものを含む） ② チューブ状の容器、③ 皿 ④ ①～③に準ずる構造、形状等を有する容器 ⑤ 容器の栓、ふた、キャップその他これらに類するもの
3. 主としてガラス製の容器 （ほうけい酸ガラス製のものおよび乳白ガラス製のものを除く）	① 瓶、② カップ形の容器及びコップ、③ 皿 ④ ①～③に準ずる構造、形状等を有する容器 ⑤ 容器の栓、ふた、キャップその他これらに類するもの
4. 主として段ボール製の容器	① 箱およびケース ② ①に準ずる構造、形状等を有する容器 ③ 容器の栓、ふた、キャップその他これらに類するもの
5. 主として紙製の容器であって飲料を充填するためのもの （原材料としてアルミニウムが利用されているものおよび4に掲げるものを除く）	① 箱およびケース ② ①に準ずる構造、形状等を有する容器
6. 主として紙製の容器 （4および5に掲げるものを除く）	① 箱およびケース ② カップ形の容器およびコップ、③ 皿、④ 袋 ⑤ ①～④に準ずる構造、形状等を有する容器 ⑥ 容器の栓、ふた、キャップその他これらに類するもの
7. 主としてポリエチレンテレフタレート製の容器であって飲料水または醬油を充填するためのもの	① 瓶 ② ①に準ずる構造、形状等を有する容器
8. 主としてプラスチック製の容器 （7に掲げるものを除く）	① 箱およびケース、② 瓶、③ 樽および桶 ④ カップ形の容器およびコップ、⑤ 皿 ⑥ くぼみを有するシート状の容器、⑦ チューブ状の容器、⑧ 袋 ⑨ ①～⑧に準ずる構造、形状等を有する容器 ⑩ 容器の栓、ふた、キャップその他これらに類するもの ⑪ 容器に入れられた商品の保護または固定のために、加工、当該容器の一部として使用される容器
9. 1～8までに掲げるものの以外の容器	① 箱およびケース、② 瓶、③ 壺および甕、④ 樽および桶 ⑤ カップ形の容器およびコップ、⑥ 皿、⑦ チューブ状の容器 ⑧ 袋、⑨ ①～⑧に準ずる構造、形状等を有する容器 ⑩ 容器の栓、ふた、キャップその他これらに類するもの

表4 分別収集の対象品目

大 分 類	対 象 品 目 の 分 類
金 属 缶	スチール缶、アルミニウム缶
ガ ラ ス び ん	白・無色透明ガラスびん、茶ガラスびん、その他のガラスびん
紙 製 の 容 器 包 装	飲料用紙パック（段ボール）（その他の紙製容器包装）
プラスチック製の容器包装	PETボトル（その他のプラスチック製容器包装）

（・）内3品目は平成12(2000)年度から、その他の7品目は平成9(1997)年度から、それぞれ実施される。

表5 分別収集基準

基準 \ 容器包装の分類	鋼製の容器包装	アルミ製の容器包装	ガラス製の容器	紙製の容器包装	PETボトル
10トン車1台分程度の量であること	○	○	○	○	○
圧縮されていること	○	○			○
他の素材の容器包装が混入していないこと	○	○	○	○	○
容器包装以外の異物が付着・混入していないこと	○	○	○	○	○
高压ガス容器以外にあっては、洗浄されていること	○	○			
高压ガス容器にあっては、内容物、ふたおよび噴射のための押しボタン（取り外しが容易なものに限る）が取り外されていること	○	○			
主としてガラス製以外のふたが取り外されていること			○		
洗浄されていること			○		○
無色、茶、その他の3色に分類されていること			○		
結晶化ガラスが混入していないこと			○		
洗浄され、乾燥されていること				○	
切り開かれ、または圧縮されていること				○	
他のプラスチック製の容器包装が混入していないこと					○
ポリエチレンテレフタレート製以外のふたが取り外されていること					○

要に応じて洗浄、乾燥、選別、圧縮などの作業が必要となり、さらなる経費負担増を覚悟しなければならないであろう。

他方、特定容器利用事業者、特定容器製造等事業者および特定包装利用事業者（いずれも輸入業者を含む）は、その使用量、製造量に応じて算定された再商品化義務量の再商品化を図らなければならない。その際、それぞれの事業者は次の三つの方法を選択することができる：

- 1) 自主回収
- 2) 指定法人への委託
- 3) 再商品化の認定（一定の基準を満たし、認定された事業者は自らまたはリサイクル事業者に委託して再商品化を行うことができる）

1) が選択されれば、市町村は分別収集を行う必要が無く、経費が軽減される。分別基準適合物が再商品化されるのは2) および3) のルートである。

5. 粉体工学・粉体技術に関連する廃棄物管理

先に、廃棄物処理の流れの中で、中間処理が粉体工学・技術に関連していると述べたが、ここでは、より具体的に概説してみたい。

「混ぜればゴミ、分ければ資源」といわれるように、廃棄物管理の基本は「選別」にある。

5.1 選別

選別は、中間処理や最終処分の前処理として非常に重要である。選別は主に有価物、可燃物、不燃物などに分別し、有価物はリサイクル・再生に、可燃物

は焼却（エネルギー・リサイクル）に、また、不燃物は埋立処分するなど、が代表例である。

また、汚泥の処理のためには、木くず、小石などとの選別が必要である。建設廃材も木くず除去などの選別を必要とする。さらに、選別は、最終処分場の延命のためにも必須である。選別の方法としては、図3に示すようなものが用いられている。機械選別は廃棄物の形状や重量差あるいは比

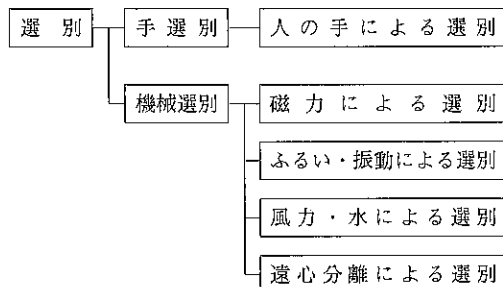


図3 廃棄物の選別の方法

重差などを利用して行われるが、廃棄物を対象とする場合、手選別との組合せが一般的に採用される方法である。

5.2 中間処理

いろいろな既存の技術、また、必要とあれば新しく開発した技術を駆使して、廃棄物を減量・減容化、安定化、無害化、資源化することであり、リサイクルを適正に行うためには、中間処理を適正に行うことが必要条件となる。

1) 減量化・減容化

焼却、脱水、濃縮、破碎・粉砕、乾燥、圧縮などの操作が用いられる。

2) 安定化

焼却、熱分解、溶融、コンクリート固型化などの操作が用いられる。

3) 安全化

焼却、滅菌等が採用されている。

4) 無害化

分解、中和、抽出などの処理が行われる。

5) 資源化

いわゆるリサイクルである。しかし、通称「リサイクル」は、本来、次のように区分されるべきである：

- ① Re-Use (再使用) : 中味と容器は不変
- ② Recycle : 同じ用途向けに再製品化
- ③ Reclamation : 異なる用途向けに再製品化
- ④ Chemical recycle : いろいろな用途向けに再原材料化
- ⑤ Energy recycle : RDF, RPF など

いずれにしても、廃棄物の収集運搬費用がボトルネックになるし、通称リサイクルに伴う「環境負荷」も考慮されなければならない。

5.3 破碎・粉砕・分級

粗大化し多種多様で大量化する廃棄物は、これを焼却するにしても埋め立てするにしても事前に破碎・粉砕処理することが必要である。ましてや廃棄物を有効利用し、有価物を回収・再利用するためには、その前処理としての破碎・粉砕工程が重要になる。リサイクルでは、破碎・粉砕は単に細かく砕くというよりは、選別・回収しやすいようにするのが目的であり、分級操作の伴った破

碎・粉砕技術がリサイクルの要素技術とされる所以である。

破碎・粉砕機には、圧縮式、衝撃式、せん断式とこれらを組み合わせた複合式がある。圧縮式粉砕機は固定板と移動板で処理物を圧縮、粉砕するもので、主にコンクリート塊など建設廃材の破碎・粉砕に利用されている。衝撃式は高速で回転するハンマーの衝撃力で粉砕する。せん断式粉砕機は回転刃などのせん断力で粉砕を行うもので、回転式、ギロチン式、往復式などの方式がある。最近、各メーカーから多く提案されているのが、二軸せん断式粉砕機であり、歯車数の異なったギアで二軸の回転数に適当な差を持たせ、これにより発生するせん断力と隣り合った刃と刃の間のせん断力で処理物を破碎・粉砕する方式である。

破碎・粉砕機の多くは、粒度調整機能を内蔵しているほか、破碎・粉砕の際の量的・質的過負荷から保護するシステムも採用されている。なお、破碎・粉砕に伴ってかなりの粉塵(シュレッター・ダスト)が発生し、これが特別管理廃棄物に指定されていることから、破碎・粉砕機の設置に際しては、このことを十分配慮しておく必要がある。

5.4 固形燃料化

廃棄物の固形燃料化技術が廃プラスチック類をはじめとする可燃性廃棄物の再資源化の有力な手段として注目されている。可燃性廃棄物を粉砕、選別、混合、乾燥、成形固化して高発熱量の固形燃料にするシステムで、通常、RDF (Refugee Derived Fuel)、RPF (廃プラスチック類のみで構成されたRDF)と呼ばれている。固形燃料の原料となる可燃性廃棄物は、生活ゴミ、廃プラスチック類、紙、繊維くず、ゴムくず、建設廃材、有機汚泥など多岐にわたる。

固形燃料化は可燃性廃棄物のエネルギー・リサイクルによる再資源化のための有効技術の一つとして、同分野に参入するメーカーが多い。この技術の普及にとっての課題の一つは固形燃料を熱源とする利用先を確保することであるが、最近、可燃性廃棄物の確保、装置メーカーおよび利用先の系列化ないしはネットワーク化が活発になってきている。

5.5 油化处理技術

固形燃料化と並んで実用化が期待されている廃プラスチック類の再資源化技術に油化处理技術がある。これは廃プラスチック類などの可燃性廃棄物を熱分解・精製して燃料油にする技術である。いろいろなシステムが提案されているが、基本的には前処理で廃棄物から廃プラスチック類を効率的に選別・回収、これを熱分解と触媒の作用で燃料油に還元する。設備が大掛かりで、コスト面で解決を要する課題も多いが、容器包装リサイクル法では平成12年度からの廃プラスチック類の資源化方法として油化が規定されており、リサイクル技術の一つとして期待されている。

6. わが国における廃棄物の現状

わが国における廃棄物の年間発生量は概数でいって、産業廃棄物が4億トンで、そのリサイクル率は約40%である。また、一般廃棄物は5,500万トン（一人一日1,100g）で、そのリサイクル率は約3.9%である。

産業廃棄物の業種別排出量では、建設業、農業、電気・ガス・熱供給・水道業が上位3業種で、以下、鉄鋼業、パルプ・紙・紙加工業、鋳業と続き、これら6業種で総排出量の8割を占めている。種類別排出量では、汚泥が最も多く約1億8千万トン、次いで動物のふん尿が7千600万トン、建設廃材が6千600万トンである。これら3品目で全排出量の8割を占めている。

種類別処理状況で見ると、再生利用率の高いのは金属くず(94%)、鋳さい(91%)で、逆に低いものでは汚泥(4%)、廃プラスチック類(24%)、ゴムくず(26%)となっている。また、排出量に対して最終処分量の比率の高い産業廃棄物は、燃え殻(84%)、ガラスくず及び陶磁器くず(72%)、廃プラスチック類(56%)となっている。

一方、厚生省による産業廃棄物処理施設の設置状況調査によると、平成6年4月現在において、許可を受けた産業廃棄物処理施設の数全体で11,018施設、最終処分場が2,687施設となっている。しかし、処分量の変化と残余容量から推算される残余年数は全国で2.3年、近畿圏では3.4年という厳しい状況である。また、産業廃棄物の不法

投棄や不適正処理が後を絶たず、環境への危機感と産廃処分場に対する不信感から住民との紛争が多発している。これには民間の「ミニ処分場」の存在が拍車をかけていることもあり、地方自治体が独自に条例によって規制していく動きが始まっている。また、今年の廃棄物処理法改正で創設された「不法投棄処理基金」（仮称）への出資を求められている建設業者の不安を和らげる狙いもあって、建設省が建設廃棄物の最終処分場に公的支援をする方策の検討を開始している。

廃棄物の中でも、最も処理が厄介なものの一つが、廃プラスチック類である。プラスチック類は大量消費・使い捨て社会をリードしてきた（かつ、優れた！）素材だけに種類も多く、排出形態も多様である。一般廃棄物として年間400～450万トン、産業廃棄物として年間500～550万トンが排出され、年々増加の一途をたどっている。廃プラスチック類は嵩だかで、腐敗もせず、何時までも原形をとどめている。このため収集運搬するにしても、埋め立て処分するにしても厄介な代物である。産業廃棄物として排出される廃プラスチック類のうち、再生利用されるのは樹脂の種類が単一で比較的量がまとまっているものが多い。このため再生利用率も先述のように低い。焼却などの中間処理による減量化率は20%で、埋め立てによる最終処分比率は56%と依然高い水準にある。

一般廃棄物の場合には、混合ゴミや複合ゴミの形で排出されるケースがほとんどで、分別が難しい上に、汚れや匂いなどの関係で再生利用は困難を極めている。今年の4月から施行された容器包装リサイクル法はそのような問題を解決する目的で制定されているが、そのための経費負担が市町村の上に重くのしかかってきている。とくにPETボトルの再資源化（技術的には問題が無いにしても）のための経費負担は、金属缶やガラス瓶の再資源化のための経費に比べて3～4倍にはなるといふ試算もある。なお、通産省が平成10年度に通常国会に提案、平成13年度から施行を予定している「家電リサイクル法」（仮称）は、一般廃棄物のリサイクル率の向上に寄与するものと期待される。

7. おわりに

家庭などから出る一般廃棄物の処理・処分は

市町村の責務とされてきたが、今年の4月から容器包装リサイクル法が施行され、容器や包装材については製造事業者や利用事業者にも責任一端を担ってもらうことになった。そういう意味では画期的な法律である。また、廃棄物処理法も改正されたが、その中では、廃棄物減量化への取り組みを事業者徹底させるとともに、リサイクルの妨げとなっている法制度の一部を改めることも意図されている。

一方、リサイクル法に基づいて、政府は品目別、業種別ガイドラインを設定しており、数値目標としてのリサイクル率を定め、毎年それを見直しているが、今年もいくつかのハードルを引き上げている。

こうした政府の動きに呼応して、産業界も廃棄物対策に積極的である。それは、何よりも最終処分場の確保が大変だからである。したがって、環境基本計画にあるように、廃棄物をできるだけ出さない、それでも出てくる廃棄物はできる限り再資源化するという選択しかない。それは環境および資源の制約を考慮すれば当然のことであるが、同時に最終処分場や中間処理施設の新設を地域住民に受け入れてもらえるような条件整備も必要である。

容器包装リサイクル法の施行などは、そうした取り組みのあらわれだろうが、それでは、どれだけ事態が改善されるかといえば、ほんの一步前進というところであろう。企業や市町村の経費負担が増加し、それは結局消費者に跳ね返ってくるからである。

企業は、最終処分場の確保が難しくなっているのも、また、ISO14000の保証認定ということもあるので、社内体制の整備、技術開発および他産業との連携などでリサイクル率を高める努力をしている。しかし、売り上げは減らしたくないか

ら、大量生産、大量消費、大量廃棄という経済社会構造は残し、大量リサイクルを付け加えようとしている、とも考えられる。

新しい資源化技術や事業が話題になることも多くなってきているが、例えば汚泥の資源化が路盤材や園芸資材など特定商品に集中しすぎている嫌いがあることも否めない。販売価格は下落し、回収された廃棄物等が溢れかえる、といった新たな問題も懸念されてきている。古紙の回収などが最近の好例であろう。

再生資源を利用した商品も売れなければ、リサイクルの輪も円滑に回らない。できるだけ市場原理を生かした循環型の経済社会を築くには、環境意識の高い消費者やユーザーが数多く育ってこなければならない。しかし、産業廃棄物を所管する都道府県も、他県からの廃棄物の持ち込みを制限するなど、受け身的な色彩が濃厚である。廃棄物管理行政を担う中央政府も問題が相当に深刻になるまで放置し、打つ手も応急的な対策になりがちである。法改正などにより、良い方向に向かってはいるが、循環型経済社会を実現させるためには、多くの問題が山積している。その際、忘れてはならないことは、「リサイクルも環境負荷を伴う行為」である、ということである。

参考文献

- 1) 厚生省生活衛生局水道環境部環境整備課監修
容器包装リサイクル法のあらましーⅡ、時代に新しい夢〈法令編〉、ぎょうせい(1996)
- 2) 同：同〈政省令内容対応版〉、ぎょうせい(1996)
- 3) 廃棄物学会編：廃棄物ハンドブック、オーム社(1996)
- 4) 宮南 啓：粉碎、No.40、40-45(1996)

メカノケミカル法を利用した都市資源からの レアアース抽出

齋藤 文良* 張 其 武

Fumio Saito

1. はじめに

希土類元素（希土類金属元素とも云う。ここではレアアースと称する）は、原子番号57のLa（ランタン）から同71のLu（ルテチウム）までの15元素と、化学的性質が類似したSc（スカンジウム）とY（イットリウム）の2元素を加えた17元素の総称である。レアアースは、例えば、蛍光材料、触媒、光学ガラス、セラミックス、磁石等の機能性材料に広く利用されており、いわゆる先端産業分野を支える重要な元素群の一つである¹⁾。これら有用元素は、モナザイト、バストネサイト、ゼノタイムなどの鉱石に含まれており、現行の処理精製プロセスでは高温抽出操作が必要とされている。これに対して、最近Zhangら²⁾は、メカノケミカル反応法を提案し、バストネサイトからレアアースを非加熱で抽出する新しいプロセスを開発している。この方法は、レアアース鉱石のみならず、それを含む物質（廃棄物などを含む）からの有価物の抽出にも展望を開くものである。

レアアースの利用形態の一つとして三波長形高演色蛍光管用蛍光体がある。年々同蛍光管の需要が増加し、同時に、寿命となって廃棄される蛍光管（廃蛍光管）の量も増加の一途を辿っている。

廃蛍光管からの有価物の再資源化については含まれる水銀やガラスカレットの分離回収が一部行われているが、レアアースについては高温、強酸性溶液による処理法が試みられている³⁾のみであり、よりマイルドな条件下での回収法の確立が望まれる。

筆者らは、廃蛍光管を将来の有望なレアアース都市資源と位置づけ、含有蛍光体をメカノケミカル処理し、従来にないマイルドな酸処理によってレアアース元素を高収率で抽出する手法の開発を試みている⁴⁾。本稿では、特に乾式メカノケミカル処理についての概要を紹介する。

2. 試料と実験

2.1 蛍光体試料

実験に用いた三波長形蛍光体試料は、蛍光管製造時に調合した以下の4種類の複酸化物混合品、 $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}^{2+}$ (BAT)：(青色蛍光体)、 $\text{LaPO}_4:\text{Ce}^{3+}$ 、 Tb^{3+} (LAP)：(緑色蛍光体)、 $\text{CeMgAl}_{11}\text{O}_{19}:\text{Tb}^{3+}$ (MAT)：(緑色蛍光体)、 $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$ (YOX)：(赤色蛍光体)である。同混合品の化学分析結果から、組成比を酸化物と仮定して表示するとTable 1 のようになる。表には

Table 1 Chemical composition of the fluorescent powder sample (wt %)

Y_2O_3	Eu_2O_3	La_2O_3	CeO_2	Tb_4O_7	$\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	
42.58	2.72	12.20	5.36	3.14	0.63	15.70

*東北大学素材工学研究所

(〒980-0812 仙台市青葉区片平2-1-1)

Tel & Fax. (022)217-5135

E-mail:saito@iamp.tohoku.ac.jp

示していないが、その他レアアース以外の元素化合物（ここでは酸化物（ SrO , BaO , MgO , Al_2O_3 など）と仮定）は不純物と見なされる。その一部の元素はメカノケミカル処理後の酸浸出でも検出され、注目元素に加えた。なお、蛍光体試料（未処理）の平均径並びに粒度分布は、後に示すFig.2を参照されたい。

2.2 乾式メカノケミカル処理

蛍光体の乾式メカノケミカル処理には遊星ミル（Fritsch, Pulverisette-7）を用いた。同ミルは2個のジルコニア製ポット（内容量：50cm³）が回転円盤（回転は時計回り）に取り付けられ（回転半径：70mm）、かつ、それ自身も同円盤と同じ速度（但し半時計回り）で回転できるようになっている。ミルポットにはジルコニア製ボール（直径：14mm）7個と蛍光体試料（粉末）5gを装填し、回転速度700rpmで乾式メカノケミカル処理（粉碎）した。実験は回分法で行い、所定時間処理した産物は全量回収した。最長処理時間は2時間（120min）であり、また、ポット内の過度の発熱を避けるため、15minミル運転後は30min停止して自然冷却する操作を行った。各粉碎処理時間後の産物は、粒度分布測定、X線回折（XRD）解析、熱分析等を行ってミル処理による粉体特性の変化を評価した。

2.3 酸処理

メカノケミカル処理産物からのレアアースの抽出には1Nの塩酸と硫酸を用いた。実験は、酸液25mlにメカノケミカル処理粉末0.5gを投入（固/液比=1/50）し、室温下で1時間攪拌後、ろ過して固液を分離し、ろ液中の含有元素をICPで分析すると共に、固体残渣はXRD法によって構成成分を同定・評価した。なお、出発試料（未処理試料）についても酸浸出を行い、同様の分析を行って参考データとした。

3. 実験結果と考察

3.1 メカノケミカル処理

Fig.1には、メカノケミカル処理混合品産物のXRDパターンを示す。同図より、処理時間の増

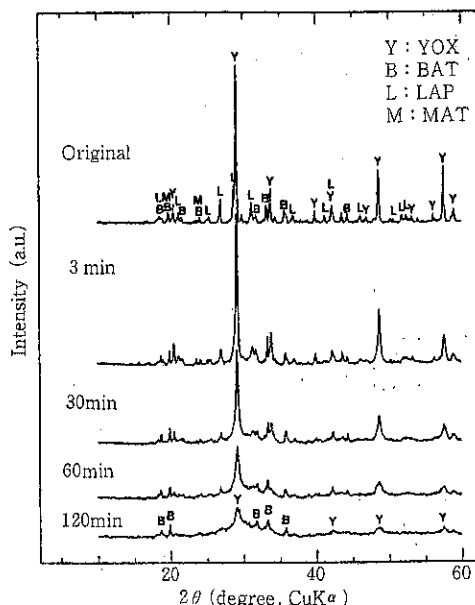


Fig.1 XRD patterns of the fluorescent powder sample ground for different times.

大と共に構成成分の特徴的な回折ピーク強度が徐々に低下していることがわかる。例えば、YOX ($\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$)のピーク強度は粉碎処理初期で急激に低下しているが、120min処理でも完全には消滅していない。また、BAT ($\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}^{2+}$)については、顕著な変化は認められない。これに対して、LAP ($\text{LaPO}_4:\text{Ce}^{3+}, \text{Tb}^{3+}$), MAT ($\text{CeMgAl}_{11}\text{O}_{19}:\text{Tb}^{3+}$)のピークはいずれも低いが、処理時間と共に小さくなり、非晶質化が進行しているものと予想される。

Fig.2には未処理混合品試料（元試料）と120min処理混合品産物の粒度分布を示す。同図より、処理時間の増大と共に産物の50%径は細粒側へ移行するが、同時に分布の幅が大となり、その粗粒部分は未処理試料の最大径よりも粗粒側に広がっていることがわかる。このことは、処理によって機械的活性が大となり粉体の一部が凝集したためであると思われる。

3.2 酸処理

Fig.3には、塩酸（1N）により抽出された各レアアースの収率とメカノケミカル処理時間との関係を示す。同図より未処理（0-min）の場合にはY, Euで約20%抽出されるが、その他のレアアースでは殆ど抽出されない。これに対してメカ

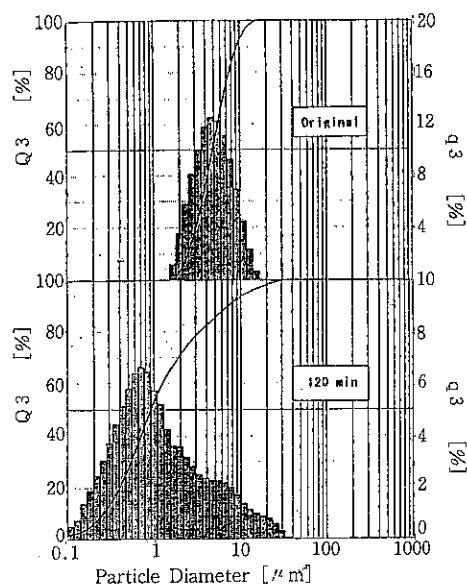


Fig.2 Size distributions of the original and the 120-minute-ground samples.

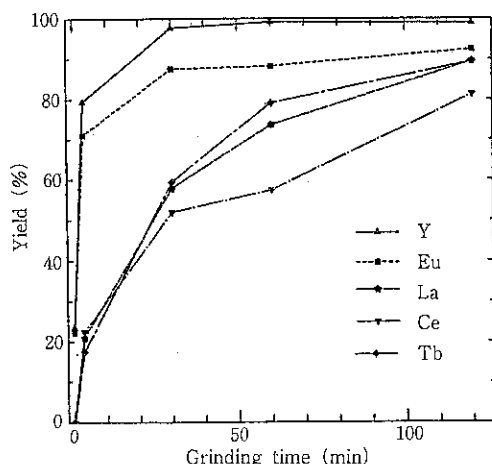


Fig.3 Yields of the rare earths extracted by 1N HCl solution from the sample as a function of grinding time.

ノケミカル処理時間3 minでは、Y、Euの収率が急激に増加し、それぞれ80%、70%に達する。さらに粉碎処理時間が長くなり30minではYでは98%、Euで85%以上となる。一方、その他のレアアースでは、メカノケミカル処理時間3 minで約20%であり、同30minでも60%以下である。更に粉碎処理時間を延長すると収率は次第に増大し、Y、Euの値に近づくが、120minでもようやく80~90%の範囲である。これは、蛍光体粉末をメカノケミカル処理することによって、その結晶

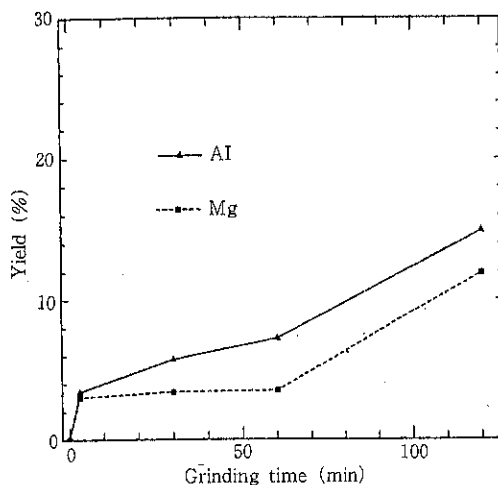


Fig.4 Yields of Al and Mg extracted by 1N HCl solution from the sample as a function of grinding time.

構造が歪み、かつ、微粒化したことと深く関連する。特にY、Euの収率が高いのはメカノケミカル処理によってY₂O₃が溶解しやすくなることに依るものであり、また、EuがYより僅かに収率が低いのは、溶解しにくいBATにEu²⁺が含まれるからと推察される。なお、ここには示さないが、硫酸処理の場合もほぼ同様の傾向にあった。

Fig.4 には、Al、Mgの2元素に注目し、それらの塩酸浸出における収率とメカノケミカル処理時間との関係を示す。同図よりメカノケミカル処

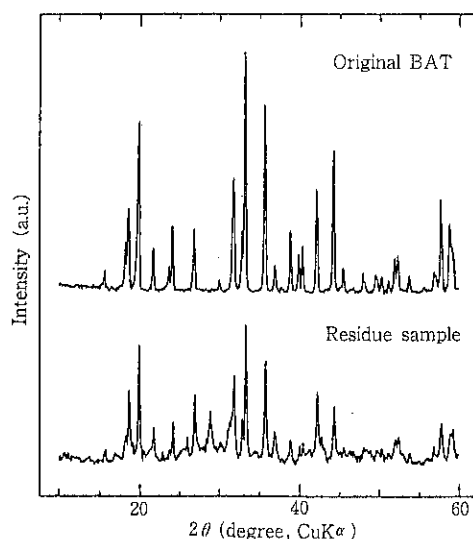


Fig.5 XRD patterns of the powder residues after the leaching test of the sample ground for 120 minutes.

理60minでも収率はAlで約7%, Mgでは約4%未満と低く, メカノケミカル処理を行ってもこれら2元素はさほど酸には溶解しないことがわかる。

Fig.5 には, メカノケミカル処理(2時間)混合品試料の酸浸出後の残渣のXRDパターンをBAT(単品)のXRDパターンと共に示す。同図より, 残渣のXRDパターンの各ピーク位置は未処理のBATのそれらと同一であり, したがって, 残渣にはBATの結晶系がかなり残存していることがわかる。このことは, BATに含まれるAl, Mg等の各酸化物もある程度残渣中に止まっていることを示唆し, Fig.4の結果と良く対応する。

4. むすび

本実験では, 三波長形廃蛍光管を将来におけるレアアースの都市資源として注目し, 蛍光体粉末試料(含レアアース)を対象として, 遊星ミルによる乾式メカノケミカル処理を行い, ついで弱酸によるレアアースの室温下での浸出実験を試みた。ここで用いた酸の濃度は, 従来の研究におけるそれよりも極端に低いものである。本実験の結果を要約すると以下ようになる。

- (1) メカノケミカル処理によってレアアース複合酸化物の結晶構造は一部維持しながらもかなり歪んだ状態になる。また, 処理時間の延長と共に産物の平均粒度は細くなるが, 凝集も起こる。
- (2) 塩酸処理工程では, 短時間のメカノケミカル処理でY: 80%, Eu: 70%と高い収率を示し, 30min処理ではそれぞれ98%, 85%となる。これに対してその他のレアアースでは30min処理でも60%程度しか収率が向上しないが, 更に処理時間を増大すると収率は徐々に増大する。な

お, 未処理粉体(元試料)ではY, Euが約20%抽出されるのみであり, その他のレアアースは殆ど抽出されない。

- (3) メカノケミカル処理産物の酸浸出工程ではAl, Mgの浸出率は10%以下と低く, 不純物混入濃度は比較的小さい。

以上の検討結果より, メカノケミカル処理時間を適宜選択することによって, 低濃度の酸によっても室温下でレアアースが高収率で抽出可能になることがわかった。今後は, 湿式メカノケミカル処理の結果を踏まえた上で, 浸出液からのレアアースの逐次分離・回収を積極的に推進する予定である。

謝 辞

蛍光体試料は(株)東京化学研究所(神奈川県大和市)のご厚意によるものであり, 同社, 神田力様には種々有益なご助言を賜りました。また, 廃蛍光管は, (協業組合)仙台清掃公社(仙台市)よりご提供いただいた。ここに記して深謝の意を表します。なお, 本研究はNEDOによる平成9年度提案公募研究として採択されたことを付記し深謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 堂山晶男監修: レア金属辞典, フジ・テクノシステム(1991)
- 2) Zhang, Q. W., F. Saito, *Hydrometallurgy*, Vol. 47, pp.231-241 (1998).
- 3) 高橋徹, 富田恵一, 作田庸一, 高野明富: 北海道立工業試験場報告, No.293 (1994) p. 7-13.
- 4) Zhang, Q.W., F. Saito, *MMIJ (Shigen-to-Sozai)*, Vol. 114, pp.253-257 (1998).

固気混相流と粉粒体流動の 数値シミュレーション

湯 晋一*

Shinichi Yu

1. はじめに

近年の計算機性能の向上により、混相流に関する諸現象の予測法は急速な発展を遂げ、今や計算機シミュレーション工学の最先端の1分野を形成しつつある。

混相流の最も大きな問題の1つは混相乱流、すなわち粒子が混在した流れにおける流体と粒子の乱流である。本講では固気混相流を例に取り、実際の混相乱流を現在どの程度シミュレーションできるか、その問題点はなにか、現実の乱流である高レイノルズ数乱流を数値解析するためにはどのようなモデルが考えられるか、そして近未来には実際の混相乱流をどこまで正確に予測できるか等を取り上げたいと思う。

現在用いられている計算方法をまとめると図1のようになる。それらの利点、欠点等について言及しよう。

粒子についてはラグランジュ法を、気流についてはオイラー法を適用するTrajectory model¹⁾²⁾³⁾が主流である。一方、粒子も気流もオイラー法で表現するTwo fluid modelによる研究例も多

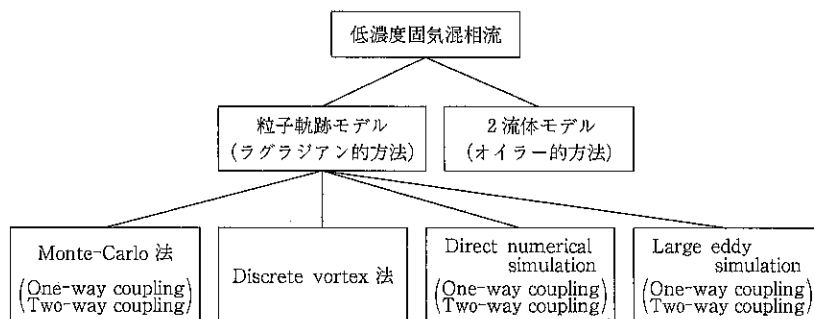


図1 低濃度固気混相流の計算モデル

い⁴⁾⁵⁾⁶⁾。まず、Trajectory modelから言及する。乱流をエネルギー含有渦の運動で代表し Monte-Carlo法で計算する方法は、現在まで最も広く用いられた計算方法の一つであるが、乱流をあまりにも単純化し過ぎているため、現在では既に限界にきている。この方法の今後の進展方向としては運動方程式と連続の式を満足する乱流渦の確率密度関数を求め、乱流をより厳密に表現し、それを用いて粒子の乱流軌跡を計算する方法が挙げられる。

次に大規模渦を空間に配置することによって乱流を表現しようとする Discrete vortexmodel⁷⁾⁸⁾がある。簡単な割りには流れをよく表現するが、大規模渦しか表現できないこと、気流と粒子の相互 Coupling を考慮 (Two-way method) すると simple であるというこのモデルの利点が失われてしまう点に問題がある。

上記のいわゆる Model とは異なり Navier-Stokes 式と連続の式を直接数値計算する Direct numerical

*九州工業大学工学部 機械知能工学科
(〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)
Tel. (093) 884-3174

simulationがある。相互couplingを考慮してオイラー形のNavier-Stokes式と連続の式およびラグランジアン形の粒子の運動方程式を同時に解く方法⁹⁾ (Two-way method) と、気流からの影響のみを考慮するOne-way method^{10) 11)}と2種類ある。乱流を表す場合、Navier-Stokes式は非定常であるからラグランジアン形の粒子の運動方程式と同時に解くほうが便利であり、必要メモリー数も少なくてもよい。したがって、粒子濃度が十分希薄な場合でも、非定常Navier-Stokes式とラグランジアン形の粒子の運動方程式を同時に解くほうが有利である。この方法の最も大きな問題は、現在のスーパーコンピュータではメッシュの幅が通常の乱流の場合、すなわち低レイノルズ数乱流でない場合、Kolmogorovのミクロスケールよりはるかに大きいことである。流れ場は3次元を考えるのでメッシュ幅とKolmogorovのミクロスケールがほぼ等しくなるためにはメッシュ総数を N とし、等方性乱流を仮定すると次式が成立しなければならない。

$$N \sim Re^{9/4}. \quad (1)$$

ただし、このレイノルズ数は流れ場の最大長さとして乱れ強度を基準にしたレイノルズ数である。現在では上式を満足するためには自由噴流でレイノルズ数は高々1000程度なので、それより高いレイノルズ数ではメッシュ幅はKolmogorovのミクロスケールより大きい。したがって、通常の乱流の直接数値計算では中程度以上の渦しか考慮していないことになる。気流と粒子の相互干渉を考えた場合、粒子は微小であるから主に微小渦に影響を与えられと考えられるが、通常の乱流の直接数値計算では中程度の渦しか存在していない。この差が現実の現象を説明するのにどのような不都合となっているか、明らかにする必要がある。最近著者ら¹²⁾は固気混相噴流のノズル出口径、ノズル出口速度基準レイノルズ数が1700の場合(この場合、流れ場の最大長さとして乱れ強度を基準にしたレイノルズ数は約1000となりメッシュ幅とKolmogorovのミクロスケールはほぼ等しい)の気流と粒子の乱流統計量(乱流特性値)を直接数値計算によって求め、実測値をよく表現することを示した。今後は固気混相噴流の乱流構造を詳細に明らかにす

るとともに、現在のスーパーコンピュータでどの程度の近似で高レイノルズ数の流れ場を表現できるかを明らかにする必要がある。アルゴリズムの改良、境界条件の適切な表現とスーパーコンピュータの並列処理等を適用すれば、かなりの改善が可能であろう。

理想乱流である等方性乱流では大規模渦が存在しないので流れ場を小さく取ることができ、通常の乱流においてもメッシュ幅をKolmogorovのミクロスケール以下にとることができ、Squires and Eaton^{13) 14)}やElghobashi and Truesdell¹⁵⁾によって等方性混相乱流の直接数値計算が行われている。Squires and Eaton^{13) 14)}はRogallo¹⁶⁾によって開発された pseudospectral 法によって粒子の存在が流体の乱流運動に与える影響や、粒子は低渦度や高ひずみ速度領域に選択的に捕集されることを示した。Elghobashi and Truesdell¹⁵⁾は乱流中の粒子の分散について差分法を用いて詳細に計算している。

直接数値計算の最大の魅力は流れ場のすべてのデータが計算されることであり、それらをデータ処理することによりすべての特性値を明らかにすることができる点である。しかし、等方性乱流のような理想乱流でなく噴流のような実際に存在する乱流を計算する場合、前述したように現在のところ直接数値計算には多くの誤差が含まれるために常に実験値との詳細な比較検討が必要であろう。

メッシュ幅よりも小さい渦をモデル化して表現し、メッシュ幅以上の渦について直接解く方法としてLarge eddy simulation (LES)¹⁷⁾が挙げられる。著者らは最近、粒子が付加されたことによる微小渦の変化をもモデル化し、高レイノルズ数乱流への粒子の影響を明らかにした¹⁸⁾。

次に完全なオイラー的方法であるTwo fluid modelについて簡単に説明しよう。このモデルは、粒子群が形成する粒子相を一つの流体と見なし、流体が浮遊している流体の連続相とあわせて、混相流を二つの異なる流体から成り立っているとモデルである。通常は $k-\epsilon$ モデルを粒子相にも適用し解けばよい¹⁹⁾。ただし、粒子相の方程式には粒子の乱流拡散係数が必要となる。多くの場合、計算によって求めたいのが粒子の乱

流拡散係数であるので、これが大きな欠点となる。このモデルの問題点は実験定数があまりにも多いことである。したがって、限られた実験値との比較ではモデルの妥当性を判断するのは難しい。このモデルは当然のことながら平均特性しか求まらない。

本報告の前半部で固気混相乱流の直接数値計算法、LESによる高レイノルズ数混相乱流のモデル化およびそれらの結果について記述する。

2. 固気混相流の直接数値計算

固気混相噴流を例にとり、Two-way methodで直接数値解析する方法を説明する。通常、気流は非圧縮性であるので、気流の支配方程式であるNavier-Stokes 式および連続の式は次のようになる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u = -\nabla P + \frac{1}{Re} \nabla^2 u - Sp \quad (2)$$

$$\nabla \cdot u = DD = 0 \quad (3)$$

ただし、式(2)、式(3)は無次元式である。 u, u_p はそれぞれ気流および粒子の無次元速度ベクトル $u = (u, v, w)$, $u_p = (u_p, v_p, w_p)$, ∇ は無次元ナブラオペレータ, P は無次元静圧, Sp は粒子が気流に与える無次元 interaction term, Re はレイノルズ数で $Re = EU_0/\nu$, D, U_0, ν はそれぞれノズル径, ノズル出口気流速度, 気流の動粘性係数である。 Sp は通常、気流が粒子から受ける抗力として表現し、気流と粒子の相対速度によって粒子後方に誘起される微小な wake 等は無視している。大粒子については粒子1個1個の局所流れを考慮する必要があるだろう。最近、梶島³³⁾³⁴⁾らによって大粒子と流体の乱流の相互作用の計算結果が報告されている。

Sp の内容は次式によって表される。

$$Sp = \frac{KDn}{U_0 \rho} (u - u_p) \quad (4)$$

$$K = 3\pi\mu D_p (1 + 0.15Re_p^{0.687}) \quad (5)$$

ただし、上式において u, u_p, Re_p 以外は有次元で、 n は粒子の個数濃度、 D_p は粒子径、 ρ, μ はそれぞれ

気流の密度および粘性係数である。 Re_p は粒子基準のレイノルズ数で、 $Re_p = D_p |u - u_p|/\nu$ と表され、式(5)は $Re_p < 800$ の範囲で適用できる。

Lagrangian形の粒子の運動方程式は Tchen²⁰⁾ によって導出され、Corsin and Lumley²¹⁾ や Maxey and Riley²²⁾ によって改良され現在に至っているが、気流中の固体粒子の運動を取り扱う場合、粒子の密度 Pp が気流の密度 p よりはるかに大きいので、抗力と外力の項以外は無視小となり簡単化される。無次元化すると次式のようになる。

$$\frac{St}{2(1 + 0.15Re_p^{0.687})} \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{dx}{dt} - u - \frac{G}{1 + 0.15Re_p^{0.687}} = 0 \quad (6)$$

ただし、 x は無次元化された直角座標系 $x = (x, y, z)$ で、 t は無次元時間、 St はストークス数 $St = \rho_p U_0 D_p^2 / 9\mu D$ で、 G は無次元沈降速度 $G = (G, 0, 0)$ である。また、 $G = \rho_p D_p^2 g / 18\mu U_0$ であり、 g は重力加速度である。 $u_p = dx/dt$, $v_p = dy/dt$, $w_p = dz/dt$ であるので式(2)、式(6)は連成され、相互に影響しあい連立して解くことになる。

式(2)を数値的に解く場合、式(2)の発散をとり、圧力 P に関するポアソンの方程式に変形して解く。式(2)の発散をとると次式が得られる。

$$\nabla^2 P = -[\nabla \cdot (u \cdot \nabla) u] - \frac{\partial (DD)}{\partial t} + \frac{1}{Re} \nabla^2 DD - \nabla \cdot Sp \quad (7)$$

数値計算法としては差分法を用い、緩和法によって式(7)を解く。連続の式である式(3)を式(7)に代入して得られる方程式を数値計算すると、種々の計算誤差によって DD は必ずしも零とならないので、その誤差が蓄積し、運動方程式に非線形不安定性を生じさせる。これを防ぐためには DD を含んだ形にし、それを評価してゆく必要がある。すなわち、実際には式(7)をそのまま解くことになる。このとき DD の値を零に近い微小値に押さえておかなければならない。その方法として時間が1ステップ進んだときの値を零とする、すなわち $DD^{n+1} = 0$ や Donovan²³⁾ と同様に式(7)の空間微

分項を零とする方法、すなわち、 $\nabla^2 DD = 0$ などを用いればよい。また、 DD が必ずしも零でないため式(2)の慣性項は、 DD に依存した値だけ運動エネルギーを保存しない。そのために蓄積された余分の運動エネルギーによって解の信頼性は低下し、最終的には無意味なものになってしまう。そこで、Piacsekら²⁴⁾の方法によって式(2)の慣性項を次式のようにエネルギー保存形として計算すればよい。

$$(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \frac{1}{2} [(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \nabla \cdot \mathbf{u} \mathbf{u}] \quad (8)$$

以上の方法によって式(2)、式(7)を数値計算すると最初から式(3)を用いなくても、時間ステップを非常に多数回(7000~8000回)進行させても常に DD の値を零に近い値(最大で 10^{-3})に押さえておくことができた。

乱流現象を直接数値計算し、それを用いて乱流特性値(乱流統計量)を求めるためには、流れ中の大規模渦の数が平均操作を行うに十分なほど多数個存在しなければならないので、非定常な乱流現象を長時間計算しなければならない。Navier-Stokes 式中の慣性項の差分形式として Rai and Moin²⁵⁾が水路の乱流の計算でフーリエ・スペクトル法と同一の結果を与えることを示した5次精度の風上差分法および通常の3次精度の風上差分法を用いた。Rai and Moin²⁵⁾が用いた5次精度の風上差分法はアライアス誤差が少なく、最良のものの一つであると思われる。その一例を次式に示す。

$$\begin{aligned} & u_{i,j,k} \frac{\partial u_{i,j,k}}{\partial x} \\ &= u_{i,j,k} \left(\frac{2u_{i+3,j,k} - 18u_{i+2,j,k} + 90u_{i+1,j,k} - 90u_{i-1,j,k} + 18u_{i-2,j,k} - 2u_{i-3,j,k}}{120\Delta x} \right) \\ &+ |u_{i,j,k}| \left(\frac{-2u_{i+3,j,k} + 12u_{i+2,j,k} - 30u_{i+1,j,k} + 40u_{i,j,k} - 30u_{i-1,j,k} + 12u_{i-2,j,k} - 2u_{i-3,j,k}}{120\Delta x} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

上式中の添字 i, j, k は x, y, z 方向の格子の位置を示す。その他の空間微分項は2次の中央差分法、時間発展項は粒子の運動方程式(6)も含めて2次のRunge-Kutta法によって計算を行った。式(4)における粒子の位置の気流速度 u は計算セル内で内挿して求めればよい。

$Re=1700$ の固気混相噴流の直接数値計算結果を示す。乱流噴流と見なすことができる。図2に噴流の中心軸上の平均速度の減衰を示す。気流の速度減衰も、粒子がノズル出口から気流によって加速され、その後粒子の慣性によって気流の速度を追い抜く様子も、計算結果は実測結果をよく表現している。図3~図5に気流及び粒子の断面平均速度分布、粒子速度の軸方向乱流強度分布を示す。計算結果は実測結果をよく表現しており、低レイノルズ数ではあるが、直接数値計算法によって固気混相乱流噴流の流れを正確に予測し得ることを示している。

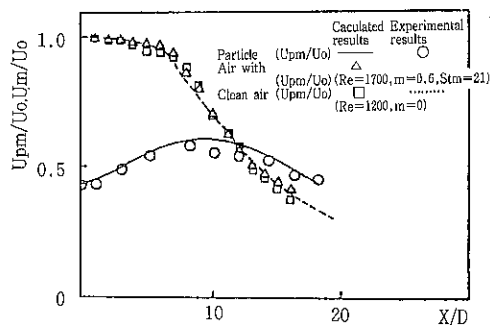


図2 噴流中心軸上における気流と粒子の速度減衰 ($m=0.6$, $St_m=21$)²⁶⁾

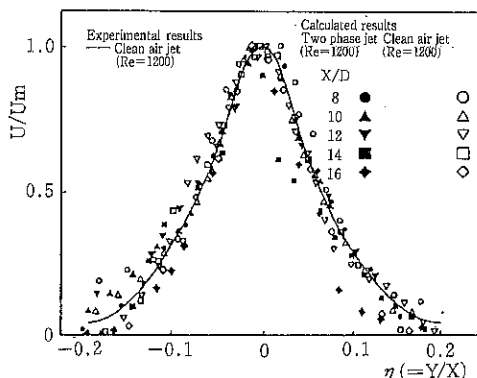


図3 噴流中の気流の軸方向平均速度の半径方向分布 ($\gamma/D=0$) ($m=0.6$, $St_m=21$)²⁶⁾

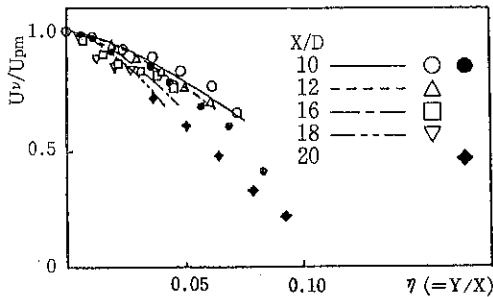


図4 噴流中の粒子の軸方向平均速度の半径方向分布 ($Z/D=0$) ($m=0.6, St_m=21$)²⁶⁾,
——, — — —, ·····, - · - ·: 計算結果,
○, △, □, ▽: 実験結果, ●, ◆: 実験結果 [Hardelupasら²⁷⁾ ($m=0.8, St_m=21$)]

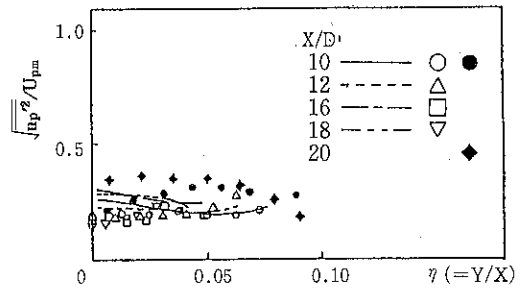


図5 噴流中の粒子の軸方向平均速度の半径方向分布 ($Z/D=0$) ($m=0.6, St_m=21$)²⁶⁾,
——, — — —, ·····, - · - ·: 計算結果,
○, △, □, ▽: 実験結果, ●, ◆: 実験結果 [Hardelupasら²⁷⁾ ($m=0.8, St_m=21$)]

粒子周りのレイノルズ数が10以下の微小粒子を含む固気混相乱流噴流では、通常、粒子の存在によって乱流が低下することが知られている。図6に直接数値計算によって得られた固気混相噴流の中心断面における瞬時の気流の速度ベクトル(細い矢印)と粒子の速度ベクトル(太い矢印)を示す。また比較のために、同一時刻、同一断面の空気噴流の速度ベクトル線図を図7に示す。いずれの図も渦を見やすくするために代表渦の対流速度として、ノズル壁前方の $X/D=4, Y/D=0.5, Z/D=0$ の平均速度を差し引いた値を示している。すなわち、代表渦の対流速度に乗って眺めた速度ベクトル線図である。両図を比較すると、噴流中心領域に存在する粒子の影響によって変動流れの抑制が起こっている。具体的にはノズル出口

壁で発生した規則的な大規模渦の持続距離の増加、粒子が多数存在する噴流中心軸近くの乱流強度の低下が見られる。この乱流強度の低下を定量的に示したのが図8で、固気混相噴流の軸方向の気流の乱流強度分布を示す。図からわかるように噴流の中心領域で固気混相噴流の乱流強度は空気の噴流のそれよりかなり低くなっており、式(4)が気流と粒子の相互干渉を表現していることを示している。 $Re=1700$ の場合、噴流は自然に乱流状態に発達し、 $X/D \geq 10$ の領域ではほぼ完全な発達乱流が形成される流れで、すなわち上流では流れを発達させる微小攪乱は十分に存在し、かつ下流では既にそれらが乱流に発達している流れなので、粒子周りのレイノルズ数 Re_p が小さい本計算例(Re_p は最大約6である)のような場合には気

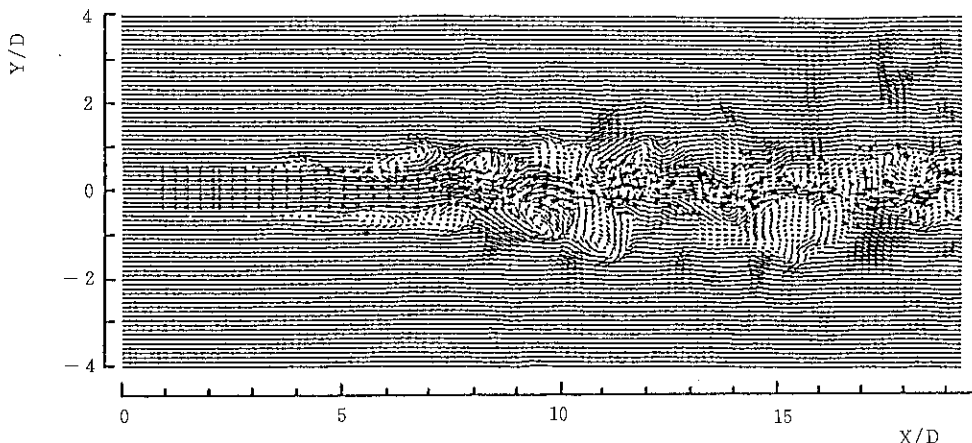


図6 固気混相噴流中の気流と粒子の瞬時速度ベクトル線図の計算結果
($m=0.6, St_m=21$) [$X-Y$ 平面($Z/D=0, t=0.155s$)]

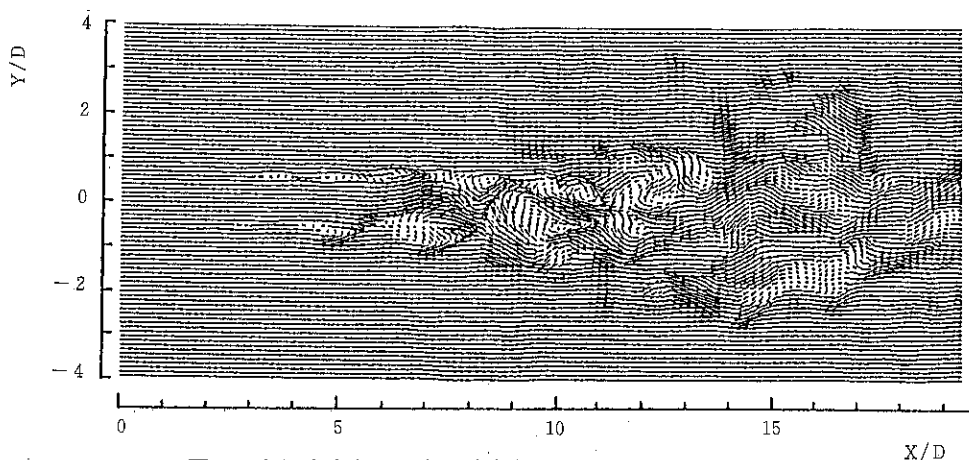


図7 空気噴流中の気流の瞬時速度ベクトル線図の計算結果
[X/Y平面($Z/D=0$), $t=0.155$ s]

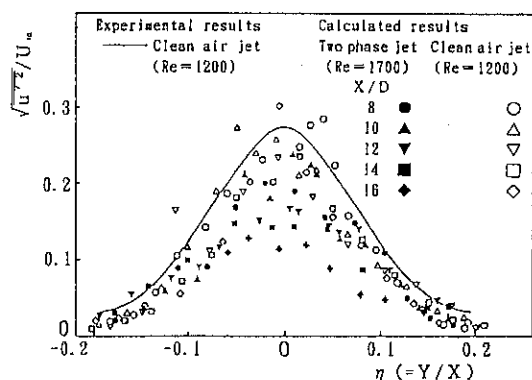


図8 噴流中の気流の軸方向乱流強度の半径方向分布 ($m=0.6$, $St_m=21$) ($Z/D=0$)²⁵⁾

流と粒子の速度差によって生ずる抗力は乱れの発生には使われず、大部分が消散作用に使われ、このように乱れを抑制すると考えられる。 Re_p が10

以下であれば粒子の後方に顕著なウェイクは発生しないので、流れから生ずる粒子周りの応力を積分して得られる抗力を気流と粒子の相互干渉項として用いるモデル式(4)は妥当である(当然のこととして粒子は計算セルよりも十分小さい)。

$Re=800$ の噴流のように不安定ではあるが流れは層流で、最初は乱れを発生するほどの攪乱が無い流れに粒子を付加し固気混相噴流とした場合の計算例を示す。計算領域、計算セルサイズ等は $Re=1700$ の場合と全く同一である。ガラスビーズの粒径、質量混合比、ノズル出口の粒子速度も $Re=1700$ の場合とほぼ同一である。図9に $Re=800$ の固気混相噴流の気流の瞬時の等渦度線図の計算結果を示す。比較のために同一レイノルズ数、同一時刻の空気噴流の瞬時の等渦度線図の計算結果を図10に、そして同一時刻の固気混相噴流

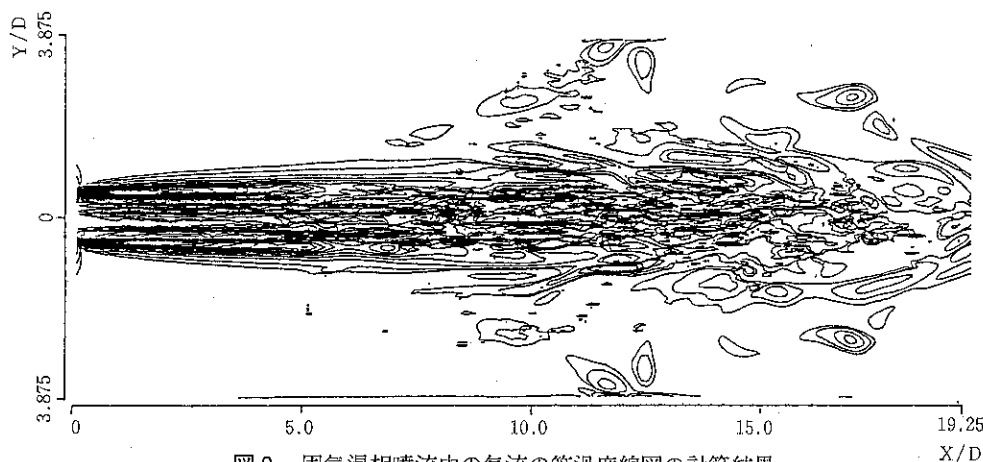


図9 固気混相噴流中の気流の等渦度線図の計算結果
($m=0.6$, $St_m=21$) [X-Y平面($Z/D=0$), $t=0.320$ s]

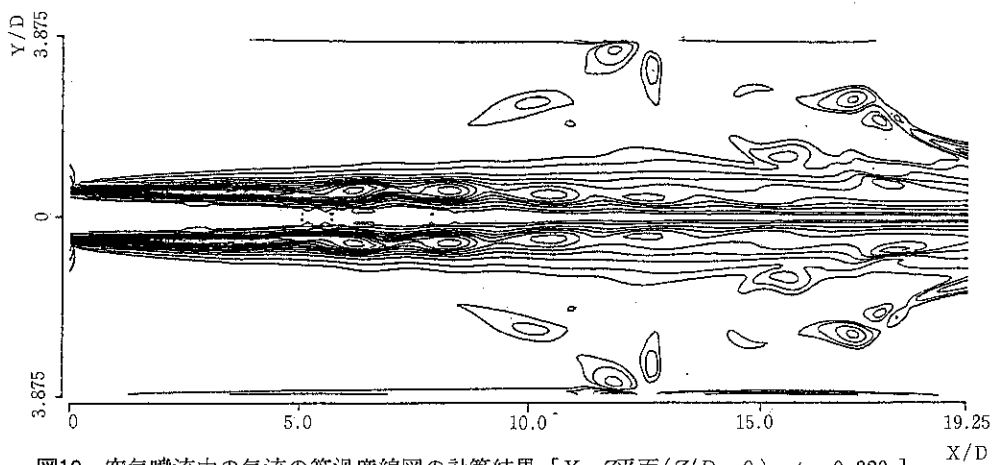


図10 空気噴流中の気流の等渦度線図の計算結果 [$X-Z$ 平面($Z/D=0$), $t=0.320s$]

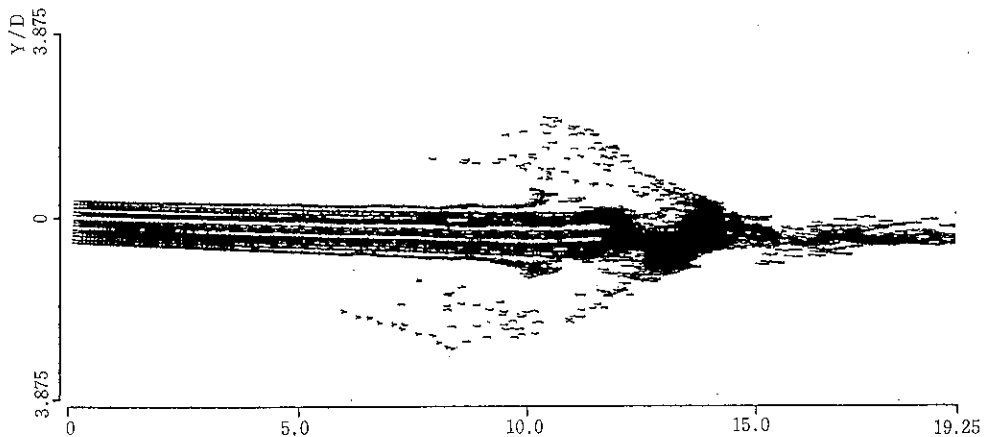


図11 固気混相噴流中の粒子の瞬時速度ベクトル線図の計算結果 [$m=0.6$, $St_m=21$]
[$X-Y$ 平面($Z/D=0$), $t=0.320s$]

中の粒子の瞬時の速度ベクトル線図の計算結果を図11にそれぞれ示す。固気混相噴流では粒子が付加されたことにより微小な渦が多数発生し、それがエネルギーを消散させて消滅していくのではなく、逆に大きな渦へと発達し、それらが図10に示されている規則的な気流の大規模渦を变形かつ分裂させ流れ全体を一瞬にして乱流に発達させている。 $Re=800$ の場合、粒子周りのレイノルズ数は高々 $Re_p=4$ であり、粒子の後方に不安定なウェイクができるような流れではない。 $Re=1700$ のように粒子が存在していないときに既に乱流が発達している流れでは気流と粒子の相対速度による抗力は既に存在している乱流エネルギーを消散する方向に働くが、図9からわかるように流れが層流状態であり、かつ $Re=800$ という高レイノルズ

数の減速流れであるので流れは非常に不安定で、それに粒子が付加されると、気流と粒子の相対速度から起こる抗力は微小攪乱となり、それが一瞬にして流れを乱流に発達させると考えられる。したがって、乱流を誘起することだけを考えるならば、粒子数は本計算例の場合よりもはるかに少なくても流れは乱流状態に遷移する。図11で粒子が横方向に広く分布しているのは噴流先端近くの大規模渦によって横方向に飛ばされた粒子群である。このような噴流の大規模渦と一旦外へ飛ばされると中心領域へ帰りにくくなる粒子の慣性とが組み合わされることによって、粒子の乱流輸送量の方が気流のそれよりも大きくなる条件が存在する可能性を示している。

次に粒子の付加による気流速度の変化の計算結

果を図12に示す。粒子は気流よりも時間的に遅らせてノズル出口を出発させるので、最初のうちは $X/D=12$ に粒子はまだ到着していないので速度変化はないが、徐々に影響が出始め、この場合気流よりも遅い粒子を付加しかつ乱流噴流に遷移するのでまず平均速度が大幅に低下し、無次元時間 $t=36$ 程度から定常的に粒子の影響が出始め、乱流固気混相噴流となる。図から層流空気噴流の規則的な渦による速度の規則変動が粒子の存在によって不規則な乱流挙動に変化していくのがわかる。この変動速度に関するエネルギースペクトル分布を図13に示す。図12に対応して固気混相噴流では低周波成分である規則的な大規模層流渦が粒子の存在によって変形、分裂することにより低周波成分のエネルギーが減少し、それによって新たに生まれた乱流渦からなる高周波成分のエネルギーが著しく増加しているのがわかる。

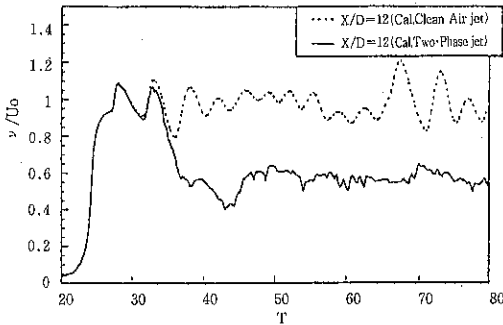


図12 軸方向瞬時速度の経時変化
($X/D=12$, $Y/D=0$, $Z/D=0$)

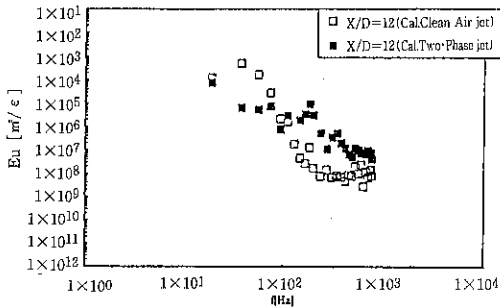


図13 軸方向乱れ速度のエネルギースペクトル
($X/D=12$, $Y/D=0$, $Z/D=0$)

3. 高レイノルズ数固気混相流の Large Eddy Simulation (LES)¹⁸⁾

流れのレイノルズ数が高くなると乱流の最小スケールは小さくなり、現在のスーパーコンピュータでのグリッドサイズは大きすぎてそれを表現することができない。そこでグリッドサイズより小さい乱流渦についてモデル化し、その結果を用いて運動方程式はグリッドサイズで数値計算する方法がLESである。グリッド内で空間平均された無次元基礎式は次となる。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \nabla \cdot \overline{\mathbf{u}'\mathbf{u}'} = -\nabla P + \frac{1}{Re} \nabla^2 \mathbf{u} - \text{Sp} \quad (10)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (11)$$

上式中の $\overline{\mathbf{u}'\mathbf{u}'}$ はグリッドサイズより小さい流れをグリッド内で空間平均することにより生ずる応力項で、これをモデル化し求める必要がある。

Sp項を含んだ通常のNavier-Stokes式にグリッドサイズより小さい流れとグリッドサイズより大きい流れに分ける操作を行い、グリッドサイズより小さいスケールの流速 u'_i を掛けて平均操作を行うとグリッドサイズよりも小さいスケールの運動エネルギー $k_s = (1/2) \overline{u'_i u'_i}$ に関する次式が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial k_s}{\partial t} + U_j \frac{\partial k_s}{\partial x_j} = 2\nu_T D + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{1}{Re} + C_k \Delta k_s^{1/2} \right) \frac{\partial k_s}{\partial x_i} \right] - C_\epsilon k_s^{3/2} \Delta^{-1} - 2Nk_s F \frac{1-b}{\alpha T_L + 1} \\ + \frac{\nu_T}{\sigma} \frac{\partial N}{\partial x_i} F(U_i - U_{pi}) \end{aligned} \quad (12)$$

但し、 $D = (\overline{D_{ij} D_{ij}})^{1/2}$, $D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$, C_k と C_ϵ は定数、 N は粒子濃度、 F は抗力の係数、 $\Delta = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}$ である。また、 U_L は平均渦の持続時間、 α は粒子の緩和時間の逆数、 $b = 3\rho / (2\rho_p + \rho)$ である。

上式で生成項、消散項そして粒子項が他の項に比較してはるかに大きいので、これら3項が釣り合っていると考えると次式を得る。

$$A1k_s + A2k_s^{1/2} - (A3 + A4) = 0 \quad (13)$$

ただし, $A1 = C_\epsilon / \Delta$, $A2 = 2FN \frac{(1-b)}{\alpha T_L + 1}$,

$A3 = 2 C_\nu T C_\epsilon^{1/3} \Delta D^2$, $A4 = \frac{C_\nu T}{\sigma} C_\epsilon^{1/3} \Delta \frac{\partial N}{\partial x_i}$
 $F(U_i - V_{pi})$ である.

また, 次元解析から求まる次の関係を用いている.

$$\nu_T = C_\nu T C_\epsilon^{1/3} k_s^{1/2} \Delta \quad (14)$$

式(13)を k_s について解くと

$$k_s = \frac{-A2 + \sqrt{A2^2 + 4A1(A3 + A4)}}{2A1} \text{ が}$$

得られ, これを式(14)に代入すれば ν_T が得られる. また ν_T を次式に代入すれば $\overline{u_i u_j}$ が求まる.

$$\overline{u_i u_j} = -\nu_T \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + \overline{u_i u_j} \quad (15)$$

ただし, $(\delta_{ij}/3) \overline{u_i u_j}$ 運動方程式の圧力項に含めて計算する.

レイノルズ数 $Re = 10^4$, 粒径 $D_p = 65 \mu\text{m}$ のガラスビーズ, 質量混合比 $m = 0.65$ の固気混相噴流の計算結果を図14, 図15に示す. 図14から噴流の軸上速度減衰は測定結果をよく表現していることがわかる. 固気混相噴流の気流の等渦度線図の図

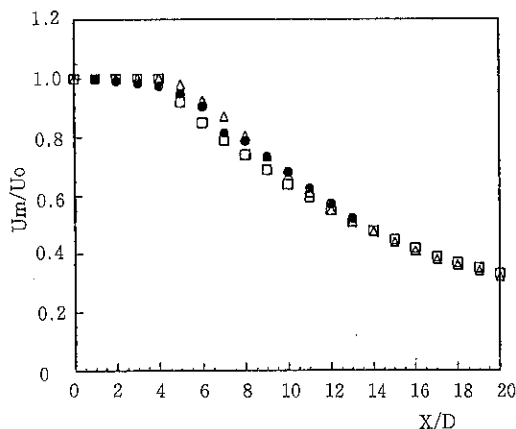


図14 噴流中心軸上における気流の速度減衰 ($m = 0.65$, $St_m = 540$), ●: 計算結果 (固気混相噴流), △, □: 実験結果 (空気噴流)

15aと空気噴流の等渦度線図 (図16) を比較すると, 粒子の存在によって気流乱流が減衰していることがわかる. 図15bには粒子の瞬時の速度ベクトル線図の計算結果を示している.

4. 高濃度固気混相流の数値計算

乱流的運動をする流動層を hard sphere model を用いて計算した例を以下に示す.

気流の支配方程式は局所的に平均された Navier-Stokes式と連続の式で, 格子幅の2倍の長さ $2\Delta x$, 流動床底面の気流噴出口速度 U_0 , 大

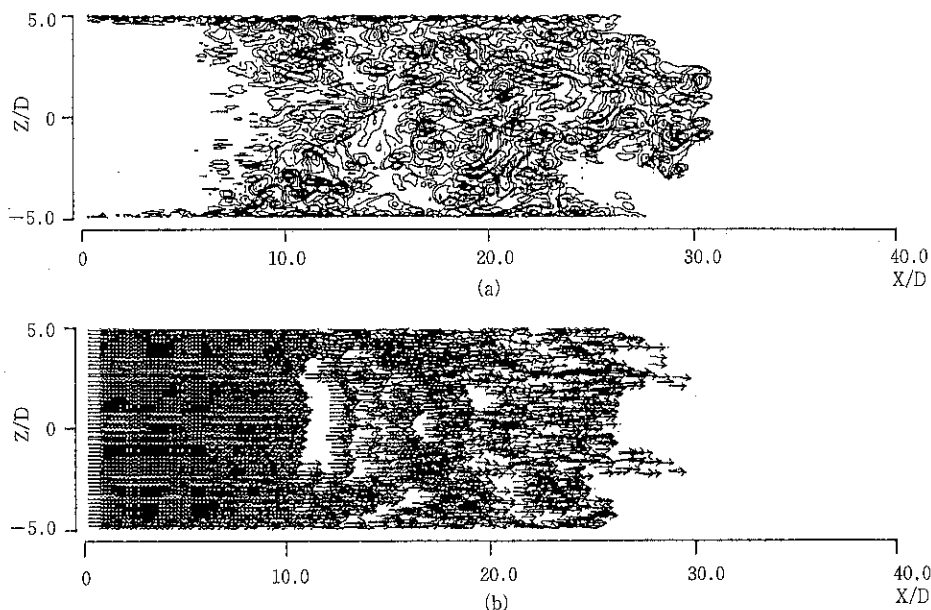


図15 固気混相噴流中の (a) 気流の等渦度線図の計算結果および (b) 粒子の瞬時速度ベクトル線図の計算結果 ($m = 0.65$, $St_m = 540$) [$X-Z$ 平面 ($Y/D = 0$), $t = 8.53 \times 10^{-3} \text{s}$]

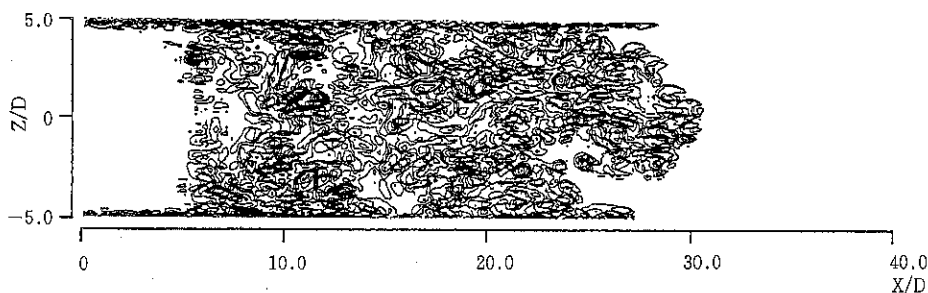


図16 空気噴流中の気流の等温度線図の計算結果[X-Z平面(Y/D=0), $t=8.53 \times 10^{-3}$ s]

気圧空気密度 ρ , 空気動粘度 ν 等によって無次元化を行うと以下ようになる。

$$\varepsilon \frac{\partial u}{\partial t} + \varepsilon u \cdot \Delta u + \Delta \cdot \varepsilon u' u' = -(\Delta \varepsilon P) - \frac{1}{Re} (\Delta \cdot \varepsilon \tau) - Sp \quad (16)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + (\Delta \cdot \varepsilon u) = 0 \quad (17)$$

$$Sp = \frac{3\pi D_p}{Re \Delta x \Delta y \Delta z} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}) n$$

$$(u - u_p) \frac{1}{\phi(\varepsilon)} \quad (18)$$

D_p は無次元粒径で, $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ は無次元セル幅であり, n は1つのセル内に存在する粒子の数である。実際の計算ではセル内に存在する粒子1個1個について計算し和している。 $\phi(\varepsilon)$ はSteinour²⁸⁾が実験的に求めた粒子群中の1個の粒子が受ける抗力を求めるための補正関数であり, 次式となる。

$$\phi(\varepsilon) = 10^{-1.82(1-\varepsilon)} \quad (19)$$

ここで式(16)中の左辺第3項の $\overline{u'u'}$ は局所的空間平均値によって生じる応力項であるが, これは前述したS.G.S.モデル²⁹⁾(Subgrid scale model)によって表した。ただし, ν_T は次式で表される。

$$\nu_T = (Cs \Delta)^2 \sqrt{2D} \quad (20)$$

$$\frac{1}{2} u_i u_i = \nu_T^2 / (C_v^2 \Delta^2)$$

上式におけるSmagorinski定数 C_s ²⁹⁾には0.1を用いた。また, C_v はYoshizawa and Horiuti³⁰⁾による $C_p=0.05$ を用いればよい。

粒子速度および粒子軌跡は次のLagrangian

形の粒子の運動方程式を解けばよい。粒子の初期条件はすべての粒子が速度零で立方格子配列しているとして計算した。

$$\frac{St \phi(\varepsilon)}{2(1 + 0.15 Re_p^{0.687})} \frac{d^2 s}{dt^2} + \frac{ds}{dt} - u + \frac{1}{1 + 0.15 Re_p^{0.687}} = 0 \quad (21)$$

ただし,

$$s = (x, y, z), G = (G, 0, 0), St = 2\phi$$

$$\frac{\rho_p D_p^2 U_0}{9\mu (2\Delta x)^2} G = \frac{\rho_p D_p^2 g}{18\mu U_0}$$

である。

また, $Re_p = \rho |u - u_p| D_p / \mu$ である。ただし, D_p は粒径である。

また, 粒子の回転角度については次式を解けばよい。

$$\frac{C}{(6.45 Re_p^{0.5} + 32.1)} \frac{d\omega}{dt} + \omega - \frac{1}{2} \Delta \times u = 0 \quad (22)$$

ただし, $\omega = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ で

$$C = \frac{4\pi}{15} \frac{\rho_p D_p^2 U_0}{\rho (2\Delta x) \nu}$$

である。また, $Re_p \omega = |\omega - (1/2) \Delta \times u| D_p^2 / 4\nu$ である。

次に粒子の衝突であるが, 粒子の運動方程式によって求めた Δt 時間後の粒子位置より, 最も接触量(粒子の重なり長さ)が大きい粒子と2粒子間のみで衝突が起こるとして, その衝突によりそれぞれの粒子の速度, 角速度が変化すると求めた。計算ではX, Y, Z座標系を相対座標系に変換して種々の値を求め, 最終的にはまたX, Y, Z絶対座標系に戻して計算を進める。粒子の衝突の運動方程式は, 粒子表面の状態により完全に粗い場合と不完全に粗い場合によって異なる。すべるか, すべらないかは最初からはわからない。した

がって、最初はすべらないとして解き衝撃力 (F_i, R) を計算し、 $F \leq \mu_p R$ であればそれが解となり、 $F > \mu_p R$ ならばすべる場合の式を用いて問題を解き直せばよい。衝突する粒子 i と粒子 j の衝撃方程式は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} m_p(v'_{ni} - v_{ni}) &= R, m_p(v'_{bi} - v_{bi}) = \\ F_i, m_p(v'_{bi} - v_{bi}) &= F_b, \\ I_p(\omega'_{ni} - \omega_{ni}) &= 0, I_p(\omega'_{bi} - \omega_{bi}) = \\ \frac{D_{pi}}{2} F_i, I_p(\omega'_{bi} - \omega_{bi}) &= \frac{D_{pi}}{2} F_b, \\ m_p(v'_{nj} - v_{nj}) &= R, m_p(v'_{bj} - v_{bj}) = \\ -F_i, m_p(v'_{bj} - v_{bj}) &= F_b, \\ I_p(\omega'_{nj} - \omega_{nj}) &= 0, I_p(\omega'_{bj} - \omega_{bj}) = \\ \frac{D_{pj}}{2} F_i, I_p(\omega'_{bj} - \omega_{bj}) &= \frac{D_{pj}}{2} F_b, \\ v'_{ni} - v'_{nj} &= e_p(v_{ni} - v_{nj}) \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

完全に粗く滑らない場合の条件式は次式となる。

$$v'_{ii} + \omega'_{bi} \frac{D_{pi}}{2} = v'_{ij} + \omega'_{bj} \frac{D_{pj}}{2} \quad (24)$$

$$v'_{bi} + \omega'_{ii} \frac{D_{pi}}{2} = v'_{bj} + \omega'_{ij} \frac{D_{pj}}{2} \quad (25)$$

不完全に粗く滑る場合、 $F = \sqrt{F_i^2 + F_b^2} \geq \mu_p R$ 、条件式は次式となる。

$$F_i = \mu_p R \frac{F_i}{F} \quad (26)$$

$$F_b = \mu_p R \frac{F_b}{F} \quad (27)$$

式(23)を式(24)、(25)又は式(26)、(27)に用いて解けば衝撃力及び衝突後の速度が求まる。ダッシュをつけた記号は衝突後の速度を示す。粒子と壁間についても同様の取り扱いを行う。

計算条件は、無次元時間ステップ $\Delta t = 0.05$ 、無次元格子幅 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.5$ 、計算セル数(内点) $128 \times 32 \times 32$ 、粒子数 8.2×10^4 、 $Re = 1874$ 、無次元沈降速度 $G = 16.3$ 、無次元粒子径 $D_p = 0.250$ 、粒子間、粒子壁間反発係数はそれぞれ $0.90, 0.95$ 、粒子間、粒子壁間摩擦係数はそれぞれ $0.25, 0.30$ である。実験に換算すると流動床底面の気流噴出速度 $U_0 = 4.5 \text{ m/s}$ 、流動床の1辺の長さ $= 100 \text{ mm}$ 、したがって有次元の $\Delta x = \Delta y = \Delta z$

$= 3.125 \text{ mm}$ 、粒径 $= 1.56 \text{ mm}$ である。

図17に計算領域を、図18に流動床底面図をそれぞれ示す。斜線部分から一様速度で気流を噴出させた。気流の噴出口の幅はメッシュ幅と等しく、1メッシュおきに気流が噴出し、多孔板から気流が噴出する場合に近い状態を作りだしている。図19に実験装置図を示す。

図20~22に代表的な時間における側壁に最も近いメッシュを含む縦断面の瞬時の粒子位置を示す。これらの図における(a)図が計算結果で、(b)図は粒径、粒子密度等の粒子物性及び粒子個数、流動床の大きさ等、すべて計算と同一条件にした実

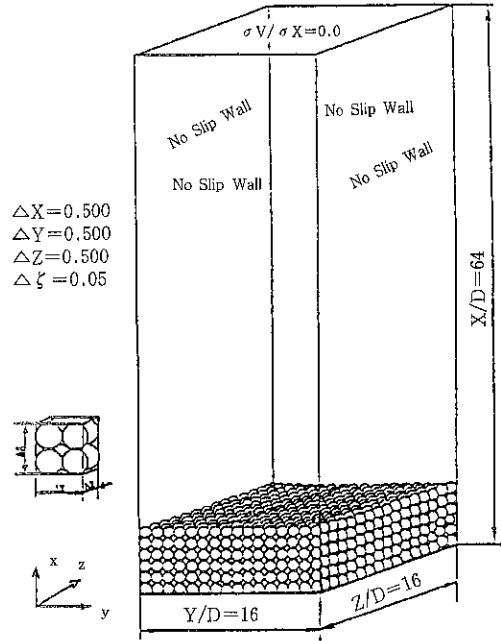


図17 計算領域

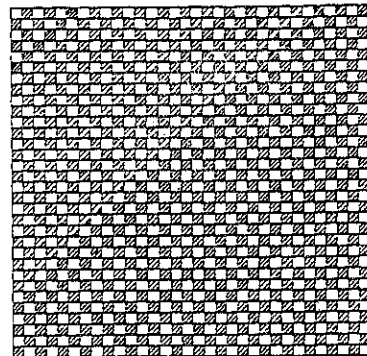


図18 流動床底面

験結果を示す。ただし、初期状態からの経過時間は必ずしも同一ではない。図から明らかなように、大規模不規則な粒子群のクラスターが形成され、気流の大規模不安定流れが起こっていることがシミュレーション結果からよくわかる。また、各図の(b)図で示されている瞬時の粒子位置の実測結果と計算結果である各図の(a)図を比較すると、シミュレーション結果は実測結果をよく表していることがわかる。

粒子の時間均速度は零であるが、粒子の速度変動強度分布を示すと図23と図24のようになる。流

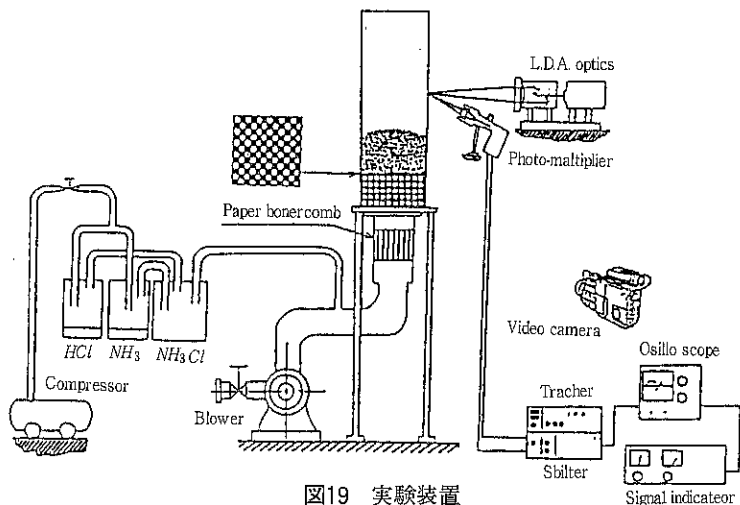
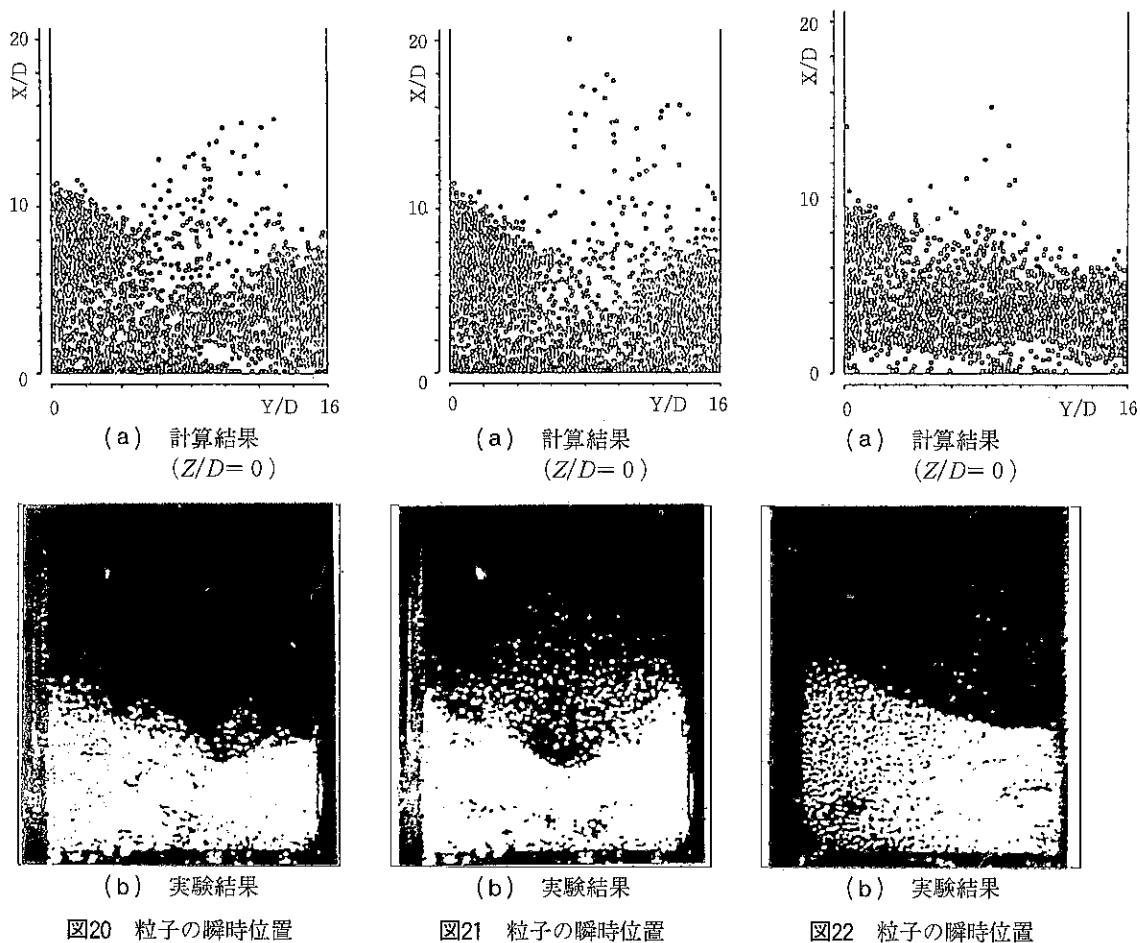


図19 実験装置

動床の底面から上方に行くに従って粒子の速度変動強度は増加する。X/D=12では多数の粒子が存在する最上部と考えられるが、 $\sqrt{u_p'^2}/U_0 \approx 0.06$



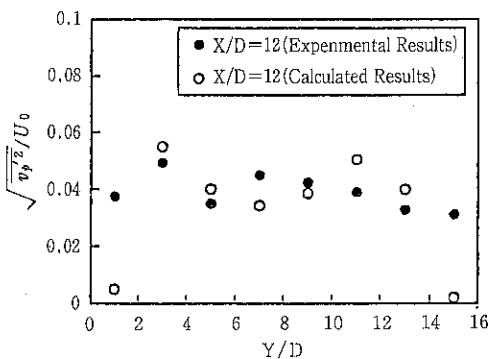
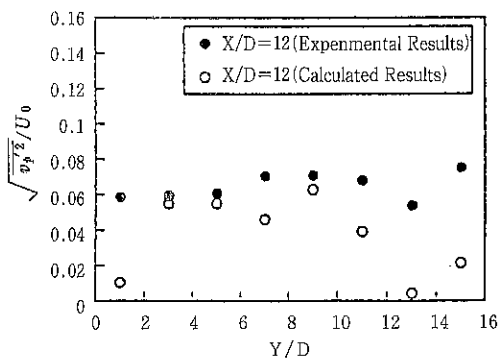
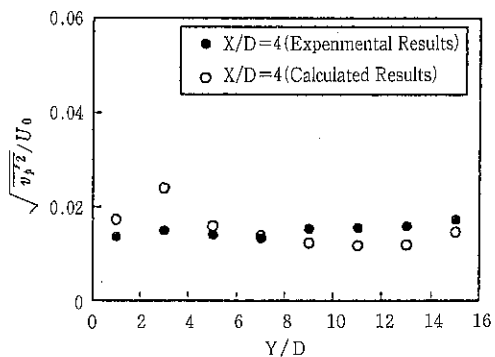
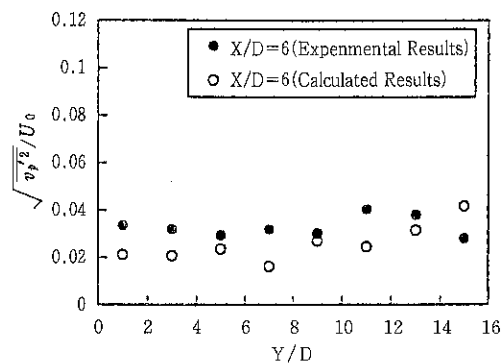
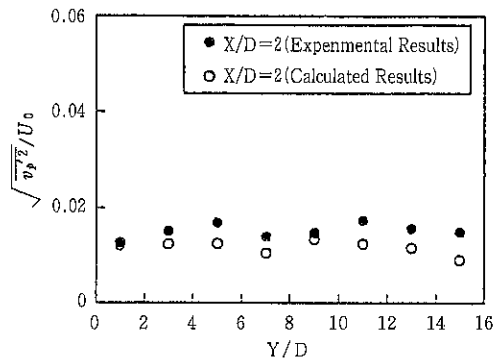
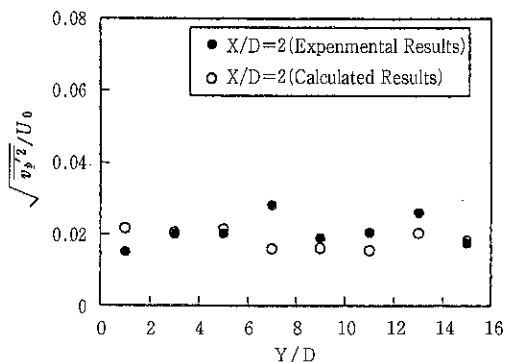
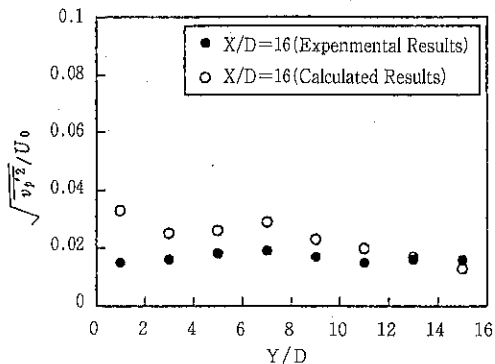
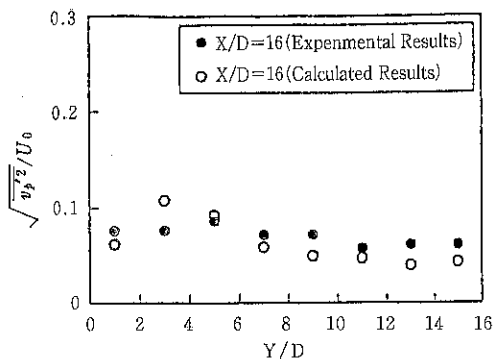


図23 粒子の軸方向乱流強度の分布
($Z/D=0$)³¹⁾

図24 粒子の半径方向乱流強度の分布
($Z/D=0$)³¹⁾



(a) 軸方向乱流強度

(b) 半径方向乱流強度

図25 気流の乱流強度の分布 ($Z/D=0$)³²⁾

であり、断面の気流の平均速度は U_0 の約1/2なので $\sqrt{u_p'^2}/U_m=0.12$ となり、大きな乱流強度を示して粒子は激しく不規則運動していることを示している。粒子の横方向速度の変動強度 $\sqrt{u_p'^2}/U_0$ は $\sqrt{u_p'^2}/U_0$ の約 $1/\sqrt{2}$ となり、粒子は大きく乱れて運動しているが、平均的に見ると近似的には均質な乱流に近いと見ることもできる。

気流の速度変動強度分布を図25に示す。粒子が存在していない領域であるにもかかわらず、ほぼ粒子の変動強度と同じ値で、流動床部の粒子の運動がいかにか大きく気流の乱流を引き起こしているかがわかる。詳しくは文献31), 32)を参照されたい。

引用文献

- 1) Yuu, S., et al.; AICHE J., 24 (1978), 509.
- 2) Shuen, J.S., et al.; AIAA J., 23 (1985), 396.
- 3) Zhang, Q.F., et al.; AIAA J., 23 (1985), 1123.
- 4) Buckingham, A.C. and W.J. Siekhaus; AIAA Paper, No.81-0346 (1981).
- 5) Elghobashi, S.E. and T.W. Abou-Arab; Phys. Fluids, 26 (1983), 931.
- 6) Chen, C.P. and P.E. Wood; AICHE J., 32 (1986), 163.
- 7) Crowe, C.T., et al.; Particulate Science and Technology, 3 (1985), 149.
- 8) Chung, J.N. and T.R. Troutt; J. Fluid Mech, 186 (1988), 199.
- 9) 湯 晋一, 梅景俊彦, 田淵政治: 混相流シンポジウム'92講演論文集 (1992), 131.
- 10) Gerz, T., et al.; J. Fluid Mech, 200 (1989), 563.
- 11) Yuu, S. and T. Umekage; ASME FED, 121 (1991), 3.
- 12) Yuu, S., T. Umekage and K. Ikeda; NEPTIS-1 (1993), 69.
- 13) Squires, K.D. and J.K. Eaton; Phys. Fluids, A2 (1990), 1191.
- 14) Squires, K.D. and J.K. Eaton; Phys. Fluids, A3 (1991), 1169.
- 15) Elghobashi, S. and G.C. Truesdell; J. Fluid Mech., 242 (1992), 655.
- 16) Rogallo, R.S.; NASA Tech. Memo, 81315 (1981).
- 17) Piomelli, U., et al.; Phys. Fluid, A 2 (1990), 257.
- 18) Yuu, S.; JSME CENTENNIAL GRAND CONGRES, ISAC '97, High Performance Comput, Multiphase Flow (1997) 67-72.
- 19) 日本流体力学会編集; 混相流体の力学 (1991), 朝倉書店, 188.
- 20) Tchen, C.M.; Dissertation-Delft (1947), The Hague, Martinus Nijhoff.
- 21) Corrsin, S. and J.S. Lumley; Appl. Sci. Res., A6 (1956), 114.
- 22) Maxey, M.R. and J.J. Riley; Phys. Fluids, 26 (1983), 883.
- 23) Donovan, L.F.; AIAA Journal, 8 (1970), 524.
- 24) Piacsek, S.A. and G.P. Williams; J. Comput. Phys., 6 (1970), 392.
- 25) Rai, M.M. and Moin, P.; J. Comput. Phys., 96 (1991), 15.
- 26) Yuu, S., et al.; Colloids and Surfaces A, 109 (1996), 13.
- 27) Hardalupas, Y., et al.; Proc. ROY. SOC. London A, 426 (1989), 31.
- 28) Steinour, H.H.; I.E.C., 36 (1944), 618.
- 29) 保原 充, 大宮司久明編; 数値流体力学 基礎と応用 (1992), 219, 東京大学出版会.
- 30) Yoshizawa, A. and K. Horiuti; J. Phys. SOC. Japan, 54 (1985), 2834.
- 31) 湯 晋一, 池田憲治, 梅景俊彦, 野原浩樹; 化学工学論文集, 22 (1996), 67.
- 32) 湯 晋一, 野原浩樹, 梅景俊彦; 日本機械学会論文集 (B編), 62-601 (1996), 3300.
- 33) Kajishima, et al.; JSME CENTENNIAL GRAND CONGRES, ISAC '97, High Performance Comput, Multiphase Flow (1997) 99-104.
- 34) 瀧口智志, 梶島岳夫, 三宅 裕; 日本機械学会論文集 (B編) 64-625 (1998) 2804.

粉粒体の選別・分離（粒）について —リサイクルへの応用—

杉本 益規*

Masunori Sugimoto

1. 緒言

近年、産業廃棄物の処理において、廃棄物に含まれている有用成分（物質）の回収とその再利用（リサイクル）は重要な課題となっている。

粉体工学的立場よりみれば、産業界から造り出された種々の固体廃棄物は人工的に造り出された巨大混合物（体）と見なすことができる。すなわち、固体産業廃棄物は有用物質（再利用可能な物質）と不用物質との混合物体であるといえよう。

このような、巨大混合物から有用物質を分離、選別することは、原鉱から有用鉱物を分離、選別する選鉱技術に通じる。したがって、人工的に造られた混合物である固体廃棄物を粉碎操作等により、有用物質（成分）の含有率の高い粒子（以下、有用成分粒子と呼ぶ）群と不用成分の含有率の高い粒子（不用成分粒子）群に細分化し、粒状化されたこれらの混合粒子群を両者の特性差により、選別、分離（粒）することは、産業廃棄物から有用成分（物質）を回収するための有効な手段の一つといえる。^{1, 2)}

本報では、上述の立場より、表題の「粉粒体の選別、分離（粒）」をファインな物質のファインな選別、分離操作に主眼をおくことよりも、むしろ、これらの前処理技術を視野に入れた、多量の有用成分を含む粒状物質をより経済的に選別、分

離（粒）することを目的とし、2, 3の知見を記述してみる。

2. 粒子の選別、分粒操作と粒子群の偏析挙動

一般に、粉粒体の選別、分粒操作では、粉粒体の(A)粒度(径)差分離、(B)密度差分離、(C)形状差分離、(D)電磁気等の物理的、化学的物性の差による分離、および(E)これらの複合化された特性差による分離、等がその対象となる。したがって、粒状化された産業廃棄物の粒子群を、有用成分粒子と不用成分粒子に選別、分離するには、両者の間に生ずる最も顕著な特性差（例えば、粒径差、密度差、形状差等）を見出し、これに適合した選別、分粒法を選択することが重要な課題である。

図1は各種選別、分離法とその主たる適応性の概略について示したものである。同図において、流体を介した分級法、フルイによる分離法、および磁気分離法、等はすでに広く知られているので、ここでは省略する。

本報では、流体を介しない分離（ここでは、これを分粒と呼ぶ）操作のうち、傾斜平板上、あるいは振動板上での粒子の転がり特性の差を利用した形状分離法、および回転容器内粒子群の流動特性の差を利用した分離法など、主として、粒子群の偏析挙動を利用した乾式連続分粒操作の代表例について記述する。

粒子群の偏析挙動を利用した粉粒体の連続分粒

*富山大学 工学部 物質生命システム工学科
(〒930-8555 富山市五福3190)
Tel.(0764)45-6829

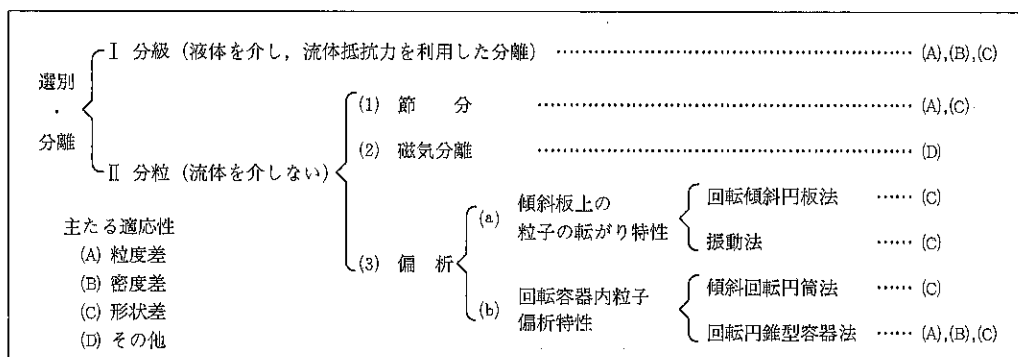


図1 粉粒体の選別・分離(分粒)法

操作を行う場合には, 次の諸点に留意する必要がある。

- (1) 特性の異なる混合粒子の偏析挙動が顕著に発現できる場をつくる。混合粒子群の偏析挙動は外力の作用を受け, 流動化することにより促される。したがって, 同じ混合粒子群であっても, それらに対する外力の与え方, 流動化の方法により, 粒子群の偏析挙動は大きく異なる。
- (2) 偏析した各粒子群を, 再混合することなく, それぞれを連続的に効率よく回収できるようにする。

以下, これらに留意して, 開発された混合粒子の連続分離(粒)操作の代表例について示す。

3. 傾斜面上の粒子転がり特性差による形状差分離操作

3.1 回転傾斜板を利用した連続形状分離操作³⁻⁷⁾

いま, 転がり特性の異なる球状粒子と非球状粒子との2成分混合粒子の分離(粒)操作について考えてみる。

(1)少量のこれら2成分混合粒子群を平板上に置き, 平板を徐々に傾け, 適正な傾斜角に調節すると, 球状粒子は転落し, 非球状粒子は板上に残留する。

この特性の異なる2成分混合粒子の偏析挙動を利用することにより, 傾斜板のbottomに転落する球状粒子と, 板上に残留する非球状粒子を再混合することなく, それぞれを回収すれば, 混合粒子の形状分離は可能となる。

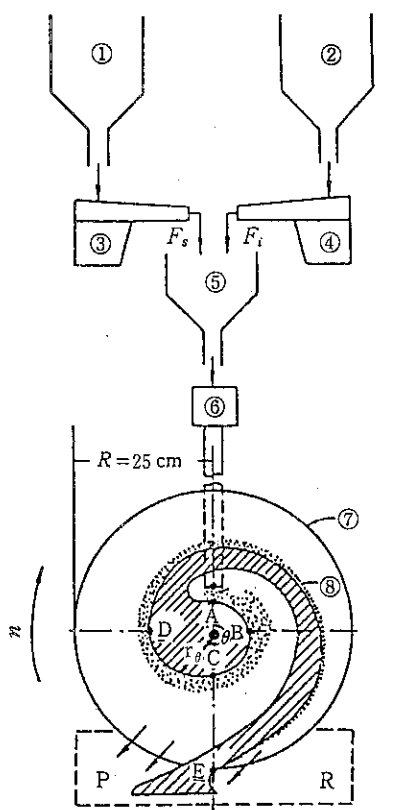
一方, (2)多量の混合粒子群を処理する場合に, 多量の球状粒子群と非球状粒子群とが傾斜板

上に同時に混在する。このような場合, 球状粒子群の一部は傾斜板のbottomに向かって転落するが, 一部は板上に残留している非球状粒子群により転落が妨げられ, bottomでは回収されない。この転落妨害の大小は分粒装置の分離効率を支配する。したがって, これらの球状粒子をできるだけ多く回収するには, 板上の非球状粒子群による妨害を小さくする必要がある。

さらに, (3)これらの混合粒子群の連続分粒操作では, 連続的に供給される粒子群のうち非球状粒子群は時間とともに, 板上に蓄積するのみならず, 球状粒子の転落をも妨害する。したがって, 上記のごとく傾斜平板を利用した混合粒子群の連続分粒操作では, 連続的に供給される球状粒子群を板上より転落させると同時に, 非球状粒子群を板上より連続的に排除, 回収しなければならない。

図2は上記(1), (2), (3)の条件を考慮して, 開発された回転傾斜円板型連続粒子形状分離(粒)装置⁵⁻⁷⁾とその機構を示した概略図である。同装置では, 回転円板⑦を球状粒子と非球状粒子との偏析挙動が十分発現できる適正な傾斜角 β に調整したのち, 円板の中央部付近(A)に混合粒子群を連続供給する。この混合粒子群は円板の回転と, 円板上に設置された静上対数渦巻き型スクレーパ⑧

(回転しない)の効果によって, スクレーパ壁に沿って移動する。その間に球状粒子群は板上のbottomに近い分離zone(B~D)にて転落し, 球状粒子回収位置(P)にて回収される。非球状粒子群, およびこれによって転落が妨害された球状粒子群の一部はスクレーパ壁(A~E)に沿って移動し, 非球状粒子群の回収位置(R)にて円板上より連続的に排除, 回収される。



- ①, ② ホッパー (球状, 非球状粒子用)
- ③, ④ 定量供給用電磁フィーダ
- ⑤ 混合用ホッパー
- ⑥ 輸送用電磁フィーダ
- ⑦ 傾斜回転円板
- ⑧ うず巻スクレーパ (静止)
- P 製品側 (球状粒子) 回収容器
- R 非製品側 (非球状粒子) 回収容器

図2 うず巻スクレーパ付傾斜回転円板型形状分離装置の概略

一方、分離zoneでの球状粒子群に対する非球状粒子群による転落妨害の大きさは分離 zone における残留非球状粒子群の円板半径方向 (厳密には、球状粒子転落方向) に対する配列個数 $N_{i\theta}$ によって支配されると考えられる。供給点Aからの偏角 $\theta = \theta$ における分離 zone のスクレーパ動径を r_{θ} とすれば、そこでの非球状粒子配列個数 $N_{i\theta}$ は(1)式のごとく与えられる。なお、ここでは、非球状粒子群の供給速度 F_i 、粒子径 d_{pi} 、粒子密度 ρ_{pi} 、および円板回転速度 n とする。

$$N_{i\theta} \propto \frac{F_i}{nr_{\theta} d_{pi}^2 \rho_{pi}} \quad (1)$$

図3は傾斜回転円板型分離装置を用いて、表1

表1

Mixt.	Materials	Density [g/cm ³]	Size range [cm]	Average dia. [cm]
A	Silica Sands* & Spherical Alumina	2.65 1.20**	0.238-0.336	0.287
B	Silica Sands* & Spherical Alumina	2.65 1.20**	0.336-0.400	0.368
C	Silica Sands* & Spherical Alumina	2.65 1.20**	0.400-0.476	0.438
D	Silica gel* & Spherical Silica gel	1.78** 1.06**	0.238-0.336	0.287

*non-spherical particles **見かけ密度

の球状粒子と非球状粒子との異形2成分混合粒子群の非連続形状分離操作を行った結果の代表例である。同図には同装置のNewton分離効率 η と操作条件との関係を示したものである。なお、同図の横軸には分離zoneにおける円板半径方向への非球状粒子群の配列個数の逆数の代表値を採用している。

これより、分離 zone における r_{θ} の代表値 ($r_{\theta c} = 8.2\text{cm}$) を採用し、これを一定とけば、次式の関係が得られる。

$$\theta = 1 - \exp \left\{ \left(\frac{nd_{pi}^2 \rho_{pi}}{F_i} \right) \right\} \quad (2)$$

($k = -10^2 = \text{const}$)

図4は図2の傾斜回転円板型形状分離装置を改良した傘型回転円板粒子形状分離装置⁷⁻⁹⁾の概略

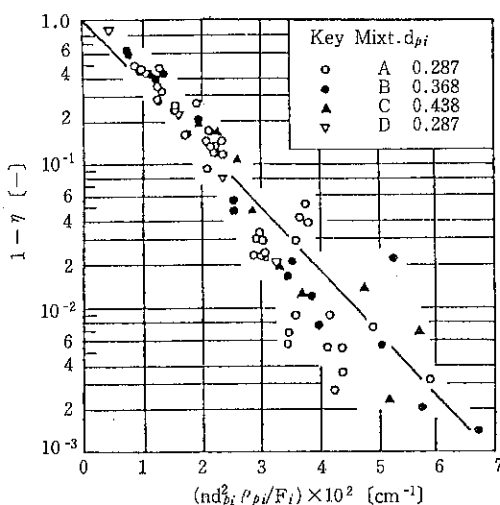


図3 Newton分離効率 η に及ぼす分離ゾーン半径方向非球状粒子配列個数の関数 $1/N_{i\theta} (\propto n d_{pi}^2 \rho_{pi} / F_i)$ の影響
(分離ゾーンの代表動径にC点の動径 $r_{\theta c} = 8.2\text{cm} = \text{const}$ を採用)

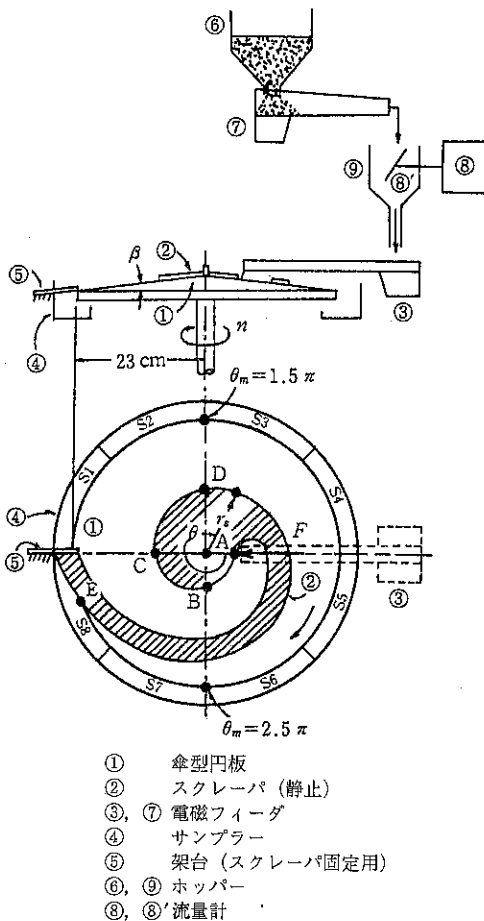


図4 傘型回転円板を用いた連続形状分離装置の概略

図である。同装置では、傘型回転円板を採用することにより、分離 zone はほぼ円板全周に拡張され、製品回収も円板全周にて可能にしている。これにより、(1)処理量の増大、(2)スクレーパー動径 (r_0) の変化に伴い、分離 zone を通過する粒子群に与える遠心効果も変化し、形状分布を有する粒子群の連続形状分離操作、等が期待できる。

3.2 傾斜振動板による粒子形状分離装置^{2,10,11)}

粒子、あるいは粒子群への加振は粒子群の易動性を増大せしめる。と同時に、振動板上や振動容器内に置かれた特性の異なる混合粒子群に種々の偏析挙動を与える。したがって、振動場における混合粒子群の偏析挙動を利用すれば、易動性の小さい微細粒子の連続形状分離操作も可能にする。

図5は傾斜振動板上の粒子偏析挙動を利用した

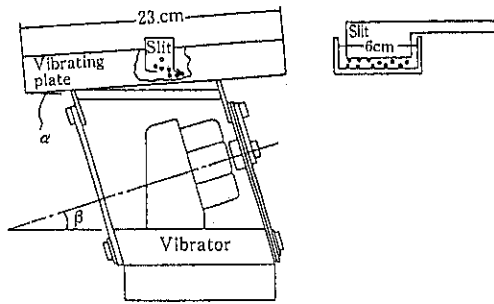


図5 傾斜振動板法¹⁰⁾

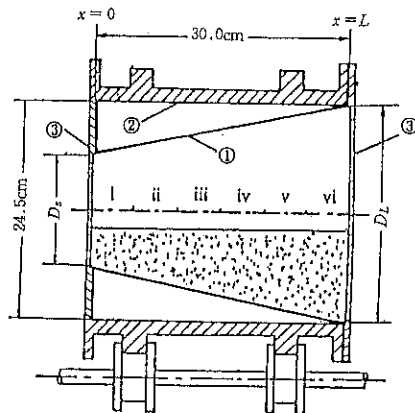
粒子形状分離装置の概略図である。装置¹⁰⁾本体は傾斜角 α で加振機に設置された樋型の傾斜振動板である。振動は板上の粒子群が飛び跳ねない程度の振幅で仰角 β の方向に加えられる。板上に供給された混合粒子は、振動板の傾斜角 α 、振動方向角 β 、振幅等を適当に調整することにより、より偏平な粒子群は振動板上端方向へ運ばれ、より球状に近く、転落の容易な粒子群は振動板下端にて、再混合することなくそれぞれ回収される。

その他、分離 zone と製品回収 zone の拡張を試みた傾斜振動平板型形状分離装置²⁾や、微細粒子群の形状分離を対象とした振動回転円板粒子形状分離装置¹¹⁾の開発も報告されている。

4. 回転容器内混合粒子群の偏析挙動を利用した連続分粒操作

4.1 回転円錐型容器内混合粒子の偏析現象^{7,12~16)}

図6に示すような截頭された水平回転円錐型容器内に装填された特性の異なる混合粒子群は容器



①円錐型容器 ②回転円筒 ③側壁

$D_s = 12.5 \text{ cm}$, $D_L = 24.5 \text{ cm}$

図6 水平回転円錐型容器

の回転に伴い容器軸方向に偏析挙動を示す。その代表例を図7, 8, 9に示す。

図7は連続粒度分布を有する硅砂(粒子径=0.5~4.0mm)の回転円錐型容器内軸方向に対する粒度差偏析挙動の一例を容器回転速度 n (rpm) をパラメータに示したものである。同図でも明らかなように、容器内粒子群の偏析特性は容器回転速度 n によって大きく変化している。回転速度が比較的小さい $n=20\sim60$ rpmでは、粒径 d_p の大なる粒子群が容器小口径端側に、 d_p の小なる粒子群は大口径端側に偏析している。しかし、 n の増大に伴いその偏析特性は逆転している。 $n=100$ rpmでは、コンカルボールミル内のボールの偏析挙動と同様に、粒径の大なる粒子群が大口径端側に、小なる粒子群は小口径端側に偏析している。

同様な偏析挙動は特性の異なる2成分混合粒子群についても観測される。図8は形状差混合粒子群の回転円錐型容器内軸方向偏析挙動の代表例を示したものである。同図には、見かけ密度(1.7g/cm³)が等しく、粒子径がほぼ等しい、形状の異なる

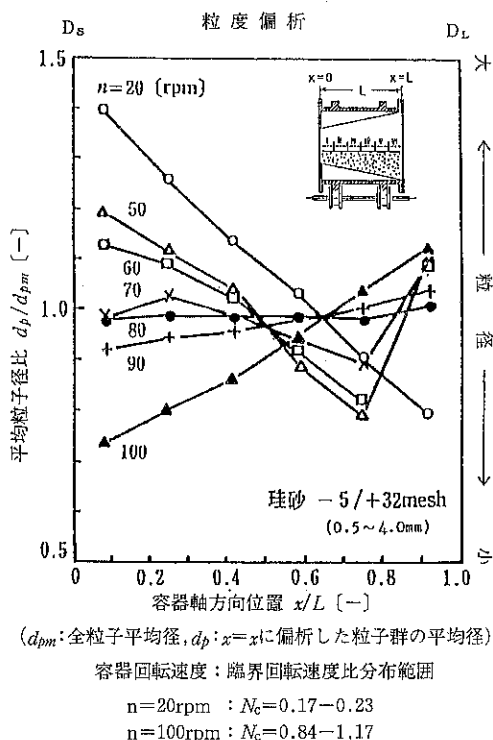


図7 円錐型容器内粒度分布粒子の粒度偏析と容器回転速度

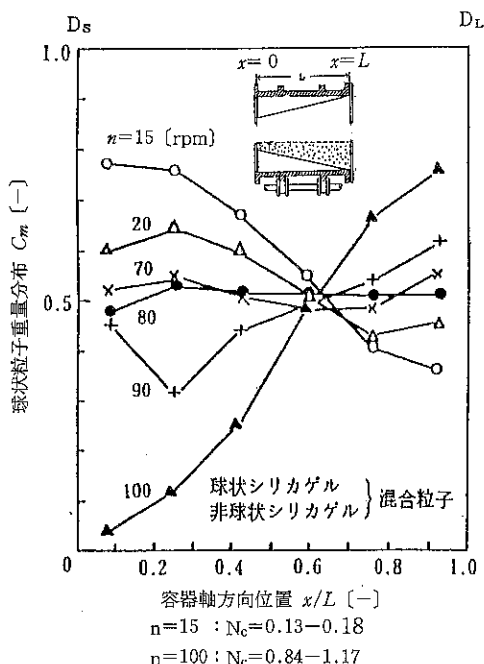


図8 円錐型容器内球状・非球状粒子混合物の形状偏析と容器回転速度

る球状シリカゲル粒子(定方向平均径=3.7mm)と破碎シリカゲル粒子群(同平均径=4.1mm)との2成分混合粒子の軸方向偏析挙動を容器回転速度(n)をパラメータに示した。容器回転速度の比較的小なる範囲($n=15, 20$ rpm)では、球状粒子群が容器小口径端側に多く偏析し、破碎粒子群は大口径端側に偏析している。しかし、その偏析特性も硅砂の粒度差偏析の場合と同様に、 n の増大にともない逆転している。

図9は、回転円錐型容器内粒子偏析挙動を利用し、連続分粒操作を行う場合、比較的有效と思わ

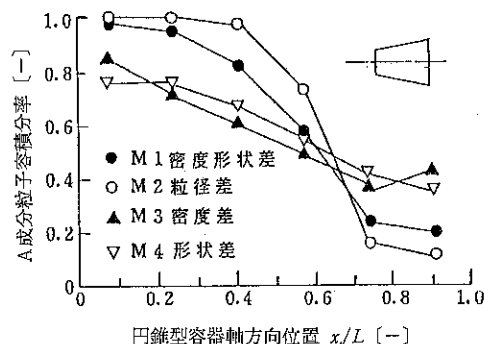


図9 回転式水平回転円錐型容器内混合粒子の容器軸方向偏析特性

れる低回転速度領域(大口径端基準による臨界回転速度比 $N_C=0.1\sim0.3$)にある円錐型容器内にて観測された、2成分混合粒子群(表2)の容器軸方向偏析特性の代表例をまとめて示したものである。同図において、

表2 2成分混合粒子

混合 粒子	粒径 [mesh]	密度 [g/cm ³]
M1 {	A: 球状アルミナ	-6/+8 1.2 **
	B: 破碎珪砂	-6/+8 2.7
M2 {	A: 球状アルミナ	-4/+5 1.2 **
	B: 球状アルミナ	-6/+7 1.2 **
M3 {	A: 球状アルミナ	-6/+7 1.2 **
	B: ガラス球	-6/+7 2.5
M4 {	A: 球状シリカゲル	3.7mm* 1.7 **
	B: 破碎シリカゲル	4.1mm* 1.7 **

*定方向平均径 **見かけ密度

M2は粒径(粒度)差混合粒子群の偏析挙動の結果であり、粒径の大なる粒子群が小口径端側に、小なる粒子群は大口径端側に偏析している。

M3は密度差混合粒子群の偏析挙動の結果であり、密度の小なる粒子群が小口径端側に、大なる粒子群は大口径端側に偏析している。

M4は形状差混合粒子群の偏析挙動の結果であり、球状粒子群は小口径端側に、非球状(形)粒子群は大口径端側により多く偏析していることが認められる。

M1は密度差と形状差を同時に有する2成分混合粒子群の偏析挙動の結果であり、球状で、密度の小なるアルミナ粒子群は小口径端側に、非球状で、密度の大きい破碎珪砂は容器大口径端側に偏析している。

上述のような、回転円錐型容器内に装填された混合粒子の容器軸方向偏析挙動は、(1)回転容器の形状特性によって与えられる粒子群のCascading流動特性の容器軸方向変化、および(2)容器内における混合粒子間の易動性の差異、とによって与えられるものと思われる。以下、これについて検討してみる。

4.2 水平回転円錐型容器内混合粒子群の流動特性と偏析挙動^{16,17)}

(1) 回転円錐型容器軸方向に対する臨界回転速度比分布

回転速度 $n=n(\text{rpm})$ で回転している円錐型容器では、容器軸方向に対する内径の連続変化に伴い、(3)式に示すように臨界回転速度比 $N_C(-)$ の容器軸方向分布が生じる。

$$N_{Cx} = \frac{n}{n_{Cx}} = \frac{n}{423} \sqrt{D_x} \quad (\because n_{Cx} = 423/\sqrt{D_x}) \quad (3)$$

ここで、 D_x は $x=x$ における容器内径(cm)である。 n_{Cx} 、 N_{Cx} はそれぞれ容器軸方向位置 $x=x$ における臨界回転速度(rpm)、および臨界回転速度比(-)である。容器小口径端を $x=0$ 、大口径端を $x=L$ とおき、それぞれの内径を D_S 、 D_L とおけば、

$$D_x = D_S + \frac{D_L - D_S}{L} x = D_S + 2x \tan \theta \quad (4)$$

ただし、 θ は容器半頂角であり、 $\tan \theta = (D_L - D_S)/(2L)$ である。したがって、

$$N_{Cx} = \frac{n}{423} \sqrt{D_S + 2x \tan \theta} \quad (5)$$

上式より、 $n=n$ で回転している円錐型容器の小口径端($x=0$)では、 N_C の最小値 N_{CO} を、大口径端($x=L$)では、 N_C の最大値 N_{CL} を示す。

(2) 回転容器内粒子流下(cascading)表面特性と臨界回転速度比 N_{Cx}

回転円筒内に装填された粒子群の流下運動は容器臨界回転速度比 N_C によって大きく変化することは知られている。図10には回転円筒内の粒子群が円滑な流下(cascading)運動と循環運動を示す臨界回転速度比の範囲($N_C=0.1\sim0.4$)において観測された、珪砂と球状アルミナ粒子群の最大すべり角 β と N_C の実験的関係の代表例を示した。

同図の結果より、近似的に次式の関係が得られる。

$$\beta = AN_C + B \quad (0.1 \leq N_C \leq 0.4) \quad (6)$$

ここで、 A 、 B は定数である。特に、 B は粒子群の粒径、形状等によって与えられる値であり、粒子群の流動(易動)性と密接に関係する値とい

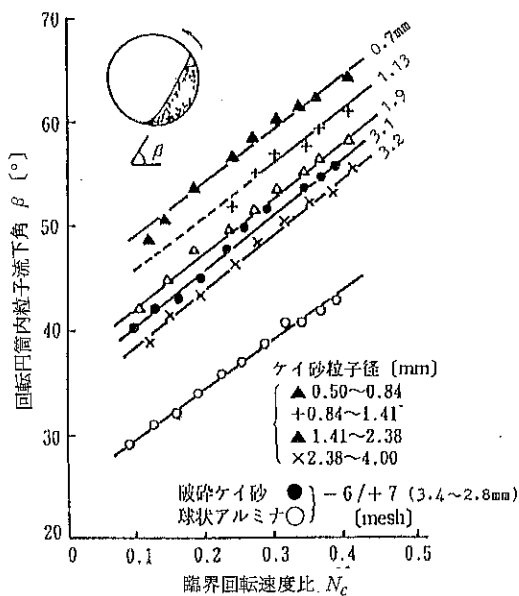


図10 回転円筒内粒子流下角 β と臨界回転速度比 N_c

えよう。(Bが小さいほど易動性が大きい)

上式より、内径が軸方向に連続的に変化している水平回転円錐型容器では、同容器内に装填された同一特性を有する粒子群においても(7)式に示すごとく、容器の回転に伴い容器軸方向に粒子の流下角 β_x 分布が生じる。

$$\beta_x = AN_c + B = \frac{An}{423} \sqrt{D_s + 2x \tan \theta} + B \quad (7)$$

すなわち、 N_c の小さな容器小口径端(D_s)では、 β_x は最小値を、 N_c の大きな大口径端(D_L)では、 β_x は最大値を示す。この円錐型容器軸方向に対する β_x 分布は粒子群の容器内軸方向偏析を促す粒子流下表面上に歪みを生ぜしめる。図11にその模式図を示す。このように歪んだ粒子流下表面での最大傾斜角方向は水平回転円錐型容器の断面方向とは一致しない。図12は水平回転円錐型容器内粒子の流動特性を2, 3の仮定を基にモデル化し、(7)式の β_x 分布をもとに同容器内の粒子流下表面上の等高線を算出し、粒子流下表面最大傾斜角方向(PQ)とその流下表面を流下(cascade)する粒子の軌跡(PQ*)を推算した代表例¹⁷⁾である。同図より、同容器内の粒子流下表面最大傾斜角方向(PQ)は、流下表面上半分では容器小口

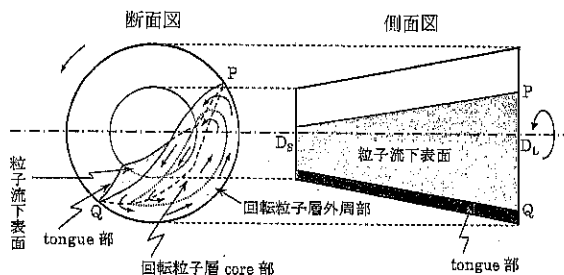
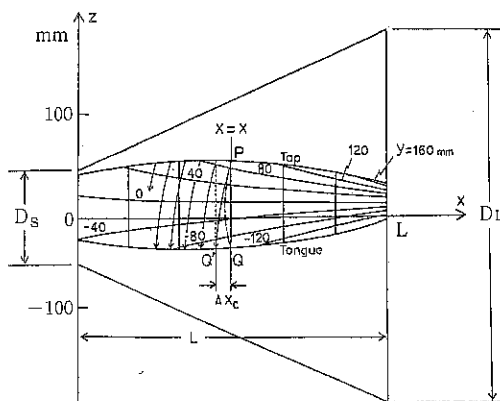


図11 水平回転円錐型容器内の粒子の挙動と流下表面の歪み



$$\begin{aligned} D_s &= 90\text{mm} \phi & H &= 15\text{mm} & A &= 2.444\text{rad} \\ D_L &= 360\text{mm} \phi & n &= 0.67\text{rps} & g &= 9800\text{mm/sec}^2 \\ L &= 300\text{mm} & B &= 0.087\text{rad} & \mu &= 0.088 \end{aligned}$$

図12 回転円錐型容器内粒子群の軸方向偏析機構のモデル図(-----PQ:最大傾斜角方向)

径端方向に、下半分では大口径端方向に向かっていることがわかる。このような流下表面上の位置(P)にある粒子が流下するとき、流下開始初期には流下表面最大傾斜角方向に向かうが、流下速度の増大とともに、慣性力により流下表面最大傾斜角方向からはずれ、容器小口径端側(Q*)に移動する。その粒子は舌(tongue)部にて回転粒子層に巻き込まれる。このように、流下運動(cascading)と回転運動との繰り返しの結果、混合粒子のうち、同容器内にて易動性の大きな粒子は容器小口径端側に移動し、小さな粒子は大口径端側に残留(偏析)するものと推定される。

(3) 回転容器内の粒子群の易動性

回転容器内の粒子群の易動性は、(1)粒子の粒径や形状等による粒子の一次特性、および(2)回転容器内断面方向の偏析位置、によって与えられる。

前者(1)は回転容器内での流下角 β (動的安息角等)に関係し、粒子流下表面での易動性を支配す

る。すなわち、 β の小さな粒子は β の大きな粒子よりも易動性は大きい。後者(2)は容器内での粒子間の自由度と関係する。すなわち、図11に示すように、回転容器内粒子層において、粒子流下表面近くに位置取りし、粒子層の外周(annulus)を循環、流下する粒子は易動性は大きく、層中心(core)部近くに偏析する粒子ほど易動性は小さい。なお、回転容器内粒子層における断面方向の位置取りは、粒子間の「浸透効果」^{18,19)}による粒子層断面方向への偏析挙動によって与えられる。

すなわち、粒径(度)差混合粒子群では、粒子流下層での「フルイ効果」^{19,20)}により、粒径の小さな粒子群はcore部に偏析する。一方、大きな粒子群は流下表面近くに偏析し、粒子層の外周を循環する。したがって、回転容器内では、粒径の大きな粒子群は小さな粒子群に比較して、その易動性は大きいことになる。

密度差混合粒子群では、粒子流下層での「push away効果」²¹⁾により、密度の大きな粒子群はcore部に偏析し、密度の小さな粒子群は流下表面近くに偏析する。したがって、回転容器内では、密度の小さな粒子群は大きな粒子群に比較して、その易動性は大きいことを意味する。

(4) 水平回転円錐型容器内混合粒子群偏析特性^{7,15,16)}

以上の検討結果をもとに、水平回転円錐型容器内混合粒子群偏析の傾向をまとめると、表3のごとく大略整理できる。なお、複数の偏析要因を有する混合粒子群の回転円錐型容器内軸方向偏析の

度合(大きさ)は混合粒子間の複数の偏析要因が相乗的に作用した場合には増大し、それらの要因が相殺的に作用した場合には減少する。

4.3 回転円錐型容器内粒子偏析挙動を利用した連続分粒操作^{16,22,23)}

(1) 回転円錐型容器による連続分粒プロセス

図13は回転円錐型容器を用いた特性の異なる混合粒子群の連続分粒プロセスのフローシートを示したものである。分粒機本体である回転円錐型容器はほぼ水平に保たれ、原料供給、製品回収、および同容器内にて粒子滞留量と分粒時間を確保す

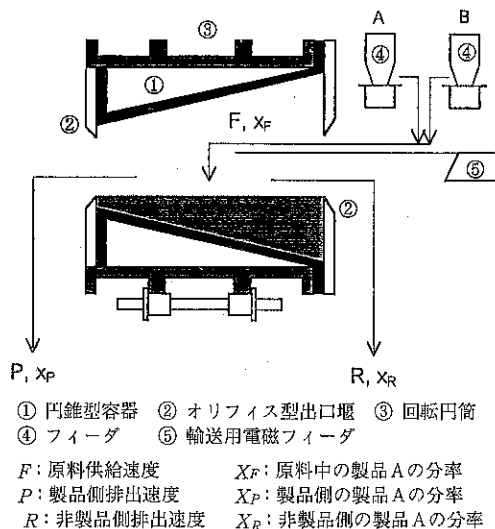


図13 回転円錐型容器による連続分粒プロセスのフローシート

表3 混合粒子特性と回転円錐型容器軸方向偏析

2成分混合粒子		粒子流下角 (動的安息角) β	回転容器内断面方向偏析		回転円錐型容器内 軸方向偏析位置
			偏析位置 (A:外周/C:中心)	流下位置 (上層/下層)	
粒径差	粒径大	小(+)	A(+)	上(+)	(+) 小口径側 D_s
	小	大(-)	C(-)	下(-)	(-) 大口径側 D_L
密度差	密度大	-	C(-)	下(-)	(-) 大口径側 D_L
	小	-	A(+)	上(+)	(+) 小口径側 D_s
形状差	球状	小(+)	-	-	(+) 小口径側 D_s
	非球状	大(-)	-	-	(-) 大口径側 D_L

(+) 易動性……大 (-) 易動性……小

るために、容器両端にはオリフィス型円形出口堰が設けられている。また、容器回転軸の傾斜角をわずかに変えることにより、容器両端からの排出速度比を調節することができる。

原料(F)は定量供給用フィーダと輸送用電磁フィーダとにより、回転円錐型容器中央部に連続定量供給される。供給された原料は容器内にて軸方向に偏析し、分粒されたのち、容器両端より連続的に回収される。ここでは、小口径端(D_s)より回収される粒子群を製品側粒子群(P)とし、大口径端(D_L)より回収される粒子群を非製品側粒子群(R)とする。

(2) 特性の異なる2成分混合粒子群の連続分粒特性と分離効率

回転円錐型容器による、特性の異なるA、B2成分混合粒子の連続分粒操作と分離効率との関係について考えてみる。なお、ここでは、A粒子を製品とし、主として容器小口径端より回収し、B粒子を非製品として、主として大口径端より回収するものとする。

いま、図13に示すように、原料供給速度をF、原料中に含まれる製品(A粒子)の分率を x_F とする。製品側排出(回収)速度をP、非製品側排出(回収)速度をR、これらに含まれる製品(A粒子)の分率をそれぞれ、 x_P, x_R とする。原料供給速度に対する製品側排出速度の比 $y(=P/F)$ 、あるいは、非製品側排出速度の比(R/F)は容器回転軸の傾斜を変えることにより調節できるものとする。したがって、容器内混合粒子が軸方向に対して完全に偏析した場合でも、両端より回収される製品(A粒子)の分率 x_P, x_R は製品側排出速度の比 $y(=P/F)$ によって、図14に示すごとく変化する。

$$\left. \begin{array}{l} 0 < P/F < x_F \quad \text{では、} \quad x_P = 1.0, \quad x_R < 1.0 \\ P/F = x_F \quad \text{では、} \quad x_P = 1.0, \quad x_R = 0 \\ x_F < P/F < 1.0 \quad \text{では、} \quad x_P < 1.0, \quad x_R = 0 \end{array} \right\} \quad (8)$$

これより、回転円錐型容器による2成分混合粒子の連続分粒操作では、粒子が同容器軸方向に完全に偏析し、理想的分粒が可能であっても、(9)式で定義されるNewton分離効率 η は排出速度比 P/F によって、図14、 $x_F=0.4$ の例、に示すごとく変化する。すなわち、同分離操作では、 $x_P=1.0$ 、 $x_R=0$ を満足する $P/F=x_F$ のときのみ、分離効

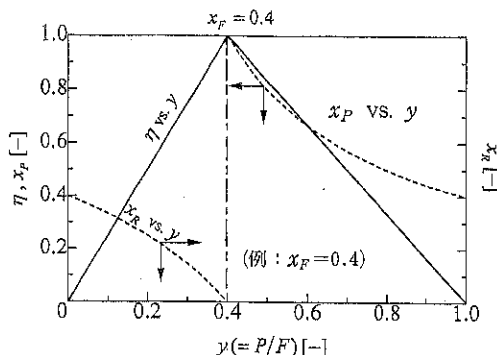


図14 2成分混合粒子の分離操作における $y(=P/F)$ とNewton分離効率 η, x_P, x_R との関係

率 $\eta=1.0$ となる。

$\eta = [\text{P側での製品(A)の回収率}] -$

$[\text{P側での非製品(B)の回収(混入)率}]$

$$= \frac{P x_P}{F x_F} - \frac{P(1-x_P)}{F(1-x_F)} = \frac{y(x_P - x_F)}{x_F(1-x_F)} \quad (9)$$

図15は、フルイ粒子径が等しく、密度と形状が異なる球状アルミナ粒子(見かけ密度 $\rho_A=1.2\text{g/cm}^3$)と破碎硅砂(密度 $\rho_B=2.7\text{g/cm}^3$)の2成分混合粒子の連続分粒実験結果の代表例を示した。

同図には、原料中の x_F をパラメータに分離効率 η と排出速度比 $y(=P/F)$ との関係を示した。

同図でもわかるように、いずれの排出速度比においても、分離効率 $\eta=1.0$ に達してはいない。ここで、 η の最大値 η_m を与える y の値を y^* とおけば、 $0 < y < y^*$ では、 $y(=P/F)$ の増大にともない、 η は増加し、 $y=y^*(< x_F)$ にて、 η は最高値 η_m を示している。また、 $y^* < y < 1.0$ では、 y の増加とともに、 η は減少している。

これは、 $0 < y < y^*$ では、 $x_P \approx 1.0$ となるが、 $y > y^*$ では、製品側に非製品(B粒子：破碎硅

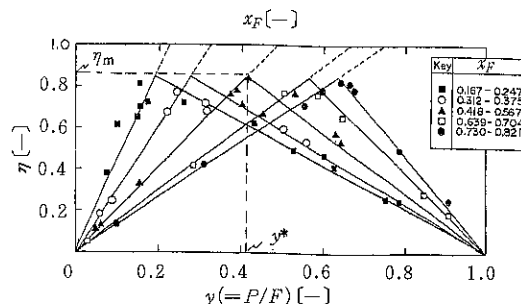


図15 球状アルミナ粒子、破碎硅砂2成分粒子の連続分粒実験結果

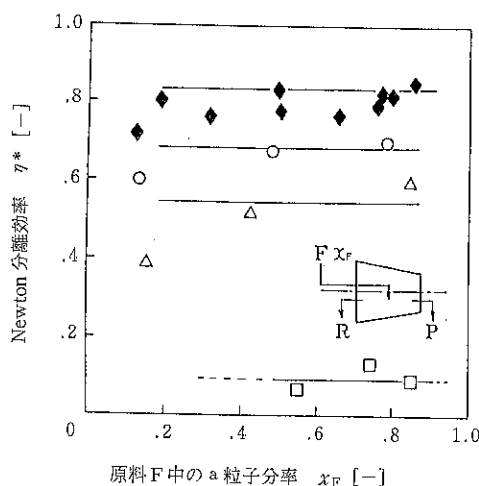
砂)が混入 ($x_F < 1$) すると同時に、非製品側にも製品 (A 粒子: 球状アルミナ粒子) が混入 ($0 < x_R < 1$) した結果、分離効率 η が減少したものである。

これらの実験結果より、 η は次式にて近似できよう。

$$\eta = \left(\frac{1}{x_F} \right) y \quad (0 < y \leq y^*, x_F \approx 1.0) \quad (10)$$

なお、原料中の製品粒子 (A 粒子) の分率 x_F なる 2 成分混合粒子の連続分粒操作において、(9) 式にて定義される Newton 分離効率は、必ずしも、 $y = y^* (x_F \approx 1.0)$ のときの分離効率 η^* が最大分離効率 η_m と一致するとは限らない。ここでは、便宜的に、製品側に含まれる製品の分率 (製品純度) $x_P \geq 0.98$ を満足する製品側排出速度比 $y (=P/F)$ の最大値を y^* とし、その時の Newton 分離効率 η を分離効率の代表値 η^* とする。

図16はこれをもとに 2, 3 の 2 成分混合粒子について、同回転円錐型容器による連続分粒特性を



原料 F 中の a 粒子分率 x_F [-]

混合粒子 No.	粒 子	フルイ範囲 [mesh]	密 度 [g/cm ³]	平均径 [cm]
◆ 1	a; 球状アルミナ (A.L)	-6/+8	1.2*	0.281
	b; 破碎珪砂 (S.S)	-6/+8	2.7	0.269
○ 2	a; 球状アルミナ (A.L)	-6/+8	1.2*	0.281
	b; 破碎シリカゲル (S.G-2)	-6/+10	1.6*	0.198
△ 3	a; 球状シリゲル (S.G)	-6/+8	1.5*	0.306
	b; 破碎珪砂 (S.S)	-6/+8	2.7	0.269
□ 4	a; 球状アルミナ (A.L)	-6/+8	1.2*	0.281
	b; 破碎シリカゲル (S.G-1)	-6/+8	1.6*	0.278

図16 回転円錐型容器内 2 成分混合粒子の分粒操作と分離効率

整理した例である。

同図は、特性の異なる 2 成分混合粒子 4 種類について、Newton 分離効率の代表値 η^* と原料中の製品粒子の分率 x_F との実験的關係を示したものである。混合粒子の特性によって分離効率は大きく異なっているが、 x_F の小さい領域を除いて、 η^* は x_F に無関係にほぼ一定値を示している。

同図の混合粒子特性による分離効率 η^* の差異は混合粒子の回転円錐型容器内軸方向偏析特性 (偏析の度合) と密接な関係にあるものと考えられる。以下、これについて検討した結果を示す。

(3) 分粒効率 η^* に及ぼす容器内軸方向粒子偏析特性

図17は連続式回転円錐型容器によるこれらの混合粒子の連続分粒特性と回分式同容器内軸方向偏析特性との実験的關係の代表例を示したものである。同図では、2 成分混合粒子の回転円錐型容器内軸方向偏析特性値の代表値として、(11) 式で定義される軸方向偏析指数 J を採用した。

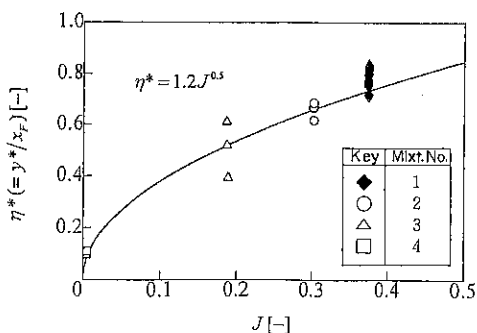


図17 分離効率 η^* に及ぼす円錐型容器内軸方向偏析指数 J

$$J = \frac{\sigma_{\infty}^2}{\sigma_0^2} \quad (\because \sigma_{\infty}^2 = \sum V_x (c_x - \bar{c})^2 / \sum V_x) \quad (11)$$

ここで、 σ_{∞}^2 は容器内の 2 成分混合粒子の偏析挙動が十分平衡状態に達した後に観測される、着目粒子 (A 粒子) の容器軸方向濃度分布 (図 8, 9) に基づく分散 (Variance) であり、 σ_0^2 は完全偏析状態にあるときの分散である。 c_x , V_x は $x=x$ における着目粒子濃度、及びサンプル量である。したがって、 $J=1.0$ に近いほど、混合粒子の容器軸

方向に対する偏析は完全偏析状態に近いことを示す。

同図よりわかるように、分離効率 η^* は偏析指数 J の増大に伴い $\eta^*=1.0$ に漸近している。なお、 J は「着目粒子仕込み濃度 $\bar{c}$ 」あるいは、連続分粒操作時の容器内着目粒子濃度 c^* により変化するが、本報では、標準的「仕込み濃度 $\bar{c}$ 」として、等容積(嵩)2成分混合粒子装填の場合($\bar{c}=0.5$)の J を採用している。

これより、予め処理をしようとする混合粒子の回転円錐型容器内の偏析指数 J を計測することにより、同容器による混合粒子群の連続分粒操作の有効性を知ることができよう。また、最適分粒操作条件の目安の一つとしては、少なくとも、製品側排出速度比 $y(=P/F)$ を製品側排出粒子群に含まれる製品粒子(A粒子)の分率 $x_p \approx 1.0$ を与える y の最大値 y^* に設定すればよいであろう。

(4) 粒径(度)差混合粒子群の連続分粒^{16,22,23)}

図18は連続粒度分布を有する珪砂(フルイ粒子径で0.5~4.76mm)の連続分粒実験結果の代表例である。容器小口径端(D_S)より大粒子群が、大口径端(D_L)より小粒子群が同時に回収されている。この排出特性は円錐型容器内の粒度偏析特性と符合する。

図19は平衡粒子径(x_e)を分離粒子径とした場合のNewton分離効率 η_e と操作条件との関係を示したものである。容器回転速度が小さい範囲($n=10 \sim 25 \text{rpm}$)では、分離効率は約80%に達してい

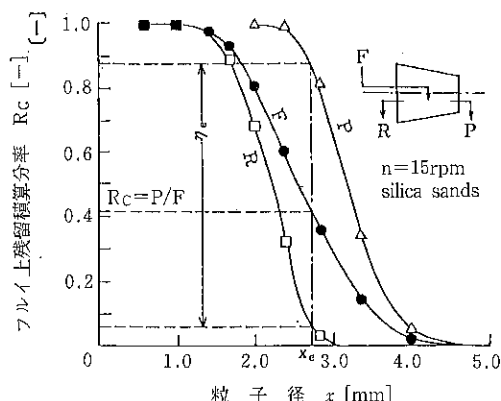


図18 回転円錐型容器による連続粒度分布粒子の分粒実験結果

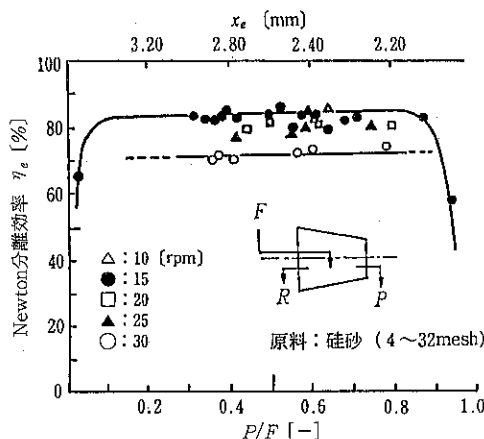


図19 水平回転円錐型容器による連続分粒試験例とNewton分離効率 η_e

る。また、 η_e は容器回転速度の増加に伴い減少している。これは、図7に示すごとく、 n の増加に伴い、混合効果が増大し、軸方向偏析の度合いが小さくなることによるものと思われる。なお、単峰性粒度分布粒子群の分粒操作における平衡粒子径 x_e (分離粒子径)の決定は、その定義より、原料供給速度に対する粗粒子側排出速度比 $P/F (=y)$ を調節することにより可能である。²⁴⁾すなわち、図18に示すように、原料粒子群のフルイ上累積分率(曲線)において、希望する分離粒子径を与えるフルイ上累積分率 R_c とおけば、排出速度比 $y(=P/F)=R_c$ を満足するように設定すればよいことになる。

その他、回転円筒内の粒子偏析挙動を利用した分粒法には、ブレード付き傾斜回転円筒法による粒子形状分離法²⁵⁾をはじめ、いくつか報告されている。²⁶⁾

また、形状分離装置については、大矢らの特集した報告がある。²⁷⁾

5. 回転円錐型容器内粒子偏析挙動を利用した造粒と分粒との同時操作^{29,30)}

上述の回転円錐型容器内の粒子の偏析効果による分粒作用と同容器の転動効果による微粉末の造粒作用を利用することにより、単一容器にて造粒と分粒との同時操作も可能となる。その一例を図20に示す。同図は粉末原料に炭酸カルシウム粉末(粒径 $6 \mu\text{m}$)、バインダーに水を採用した場合の

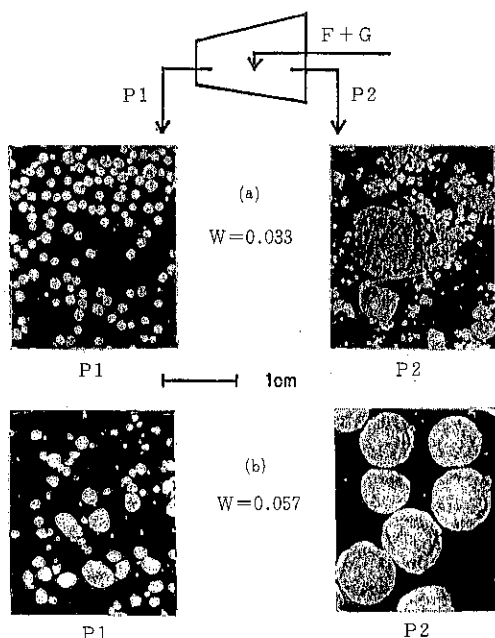


図20 単一水平回転円錐型容器の両端(P1:小口径端, P2:大口径端)から同時に回収された炭酸カルシウム-水系造粒物(W:バインダー(水)・原料(炭酸カルシウム粉末)供給速度比G/F)

代表例である。(なお、本造粒粒子群の偏析挙動は主にtongue部で生じ¹⁷⁾、前述の4-(4)の場合の排出特性とは異なる)

6. 結 言

以上、粉粒体の選別・分離について、主として粒子の偏析挙動を利用した2, 3の粉粒体の選別・分離装置の試作と開発を紹介し、その可能性について記述した。

これらに関する実用データはいまだ十分とはいえないが、これらの装置・操作は比較的単純で、連続操作も可能であることから、より多量の粒状物質をより経済的に選別・分離するためのプロセスとしての実用化は十分有効なものと考えられる。従って、今後、これらの結果を産業廃棄物処理に利用する場合には、さらに多くの実用データの蓄積とこれに基づく最適操作条件等の検討が必要と思われる。

参 考 文 献

1) 泉川, 佐々木, 大矢, 遠藤, 岩田: 粉体工学

会誌, 32, 378 (1995)

- 2) 古屋伸, 遠藤, 岩田: *ibid.*, 32, 385 (1995)
- 3) Carpenter, F., G., et al.: *J. Research N.B.S.*, 47, 139 (1951)
- 4) Riley, G. S.: *Powder Tech.*, 2, 315 (1968)
- 5) 杉本, 山本: 粉体工学研究会誌, 8, 426 (1971)
- 6) Sugimoto, M., K. Yamamoto and J. C. Williams: *J. Chem. Eng. Japan*, 10, 137 (1977)
- 7) 杉本: 粉碎, N0.31, p. 40 (1987)
- 8) 山本, 杉本: 粉体工学会誌, 22, 813 (1985)
- 9) 山本, 塚田, 杉本: *ibid.*, 26, 12 (1989)
- 10) Abe and Hirose: *J. Chem. Eng., Japan*, 15, 323 (1982)
- 11) 山本, 玉生, 杉本: 粉体工学会誌, 32, 612 (1995)
- 12) 杉本: 材料, 21, 572 (1972)
- 13) 杉本, 山本: 材料, 26, 844 (1977)
- 14) 杉本, 山本: 化学工学論文集, 5, 335 (1979)
- 15) Sugimoto, M.: *Proceedings of International Symposium on Powder Technology '81*, p. 726 (1982). 国際粉体工学シンポジウム論文集, 粉体工学会編 (1981)
- 16) 杉本: 粉体と工業, 18, 23 (1986)
- 17) 杉本, 杉原, 山本: 材料, 40, 1591 (1991)
- 18) 杉本, 山本: 材料, 25, 684 (1976)
- 19) Bridgwater, J., et al.: *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 47, 114 (1969)
- 20) 三輪: 粉粒体工学, p. 221-230, 朝倉書店
- 21) Tanaka, T.: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 10, 332 (1971)
- 22) 杉本, 松井, 山本: 化学工学論文集, 7, 512 (1981)
- 23) 杉本: 粉碎, 29, 53 (1985)
- 24) 泉: 化学工学, 22, 238 (1958)
- 25) Furuuchi, M., et al.: *Powder Tech.*, 50, 137 (1987)
- 26) Furuuchi, M. and K. Gotoh: *ibid.*, 54, 31 (1988)
- 27) 大矢: 粉体と工業, 23, 29 (1991)
- 28) 古内: *ibid.*, 23, 44 (1991)
- 29) 杉本, 川上: 化学工学, 22, 238 (1982)
- 30) 杉本, 川上, 中村: 材料, 31, 888 (1982)

廃棄物処理回収事例

山下 治壽**

Toshiharu Yamashita

1. 緒 言

最近、地球環境に関する諸問題がクローズアップされている。化石燃料の大消費とCO₂発生による地球の温暖化、SO_x NO_x による酸性雨、フロンガスの大量放出によるオゾン層の破壊、重金属や有機塩素系化合物等の廃棄物による水質汚染および海洋汚染、さらに、木質系資源の大量伐採による熱帯林の減少と砂漠化など、地球規模で広がる環境破壊に対して、地球環境保全がさげばれている。1992年6月ブラジルのリオデジャネイロで開催された「国連環境開発会議」地球サミットでは世界180カ国が参加して、経済活動と環境保全の両立・共生をテーマに持続可能な発展の実現を目指すことを合意した。

わが国においても、1989年のアルシュ・サミットを契機に、地球環境問題に本格的に取り組むため全省庁に「地球環境保全に関する関係閣僚会議」を設置して、国際的な枠組み作りに積極的に参加し、技術開発・普及に努め、途上国への協力を拡充するとともに、今後“地球環境への負荷が少ない方法で社会経済が営まれるよう”に最大限努力すべきことが述べられている。通産省の「ボランティアプラン」(1992)や環境庁の「環境にやさしい企業行動指針」(1993)が発表された。

こうした地球環境問題に対する基本認識は、政府のみならず、産業界においても、経団連の「地球環境憲章」(1991)に、企業の環境に対する基本理念や行動指針を明文化し、経営方針、社内体制、生産プロセスにおいて、環境負荷を軽減するよう、システムの見直し変更を推進するものであった。

このような世の中の動きから、1992年「再生資源の利用の促進に関する法律」いわゆるリサイクル法が成立し、1997年4月より施行された。こうした立法化の措置は、わが国の21世紀におけるリサイクル社会の構築へ向けて、具体的な方向を示すものであり、地球環境保全への確実な第一歩となるものである。

ところで、当社においては、創業以来80年間、粉体技術の進歩と発展に努力してきた。戦後、日本経済の復興と共に産業活動の活性化により、大量の汚染物質を放出することにより起こった公害問題、特に大気汚染防止に関しては、ホソカワ/マイクロパルスエアーにより粉塵を濾過集塵して環境浄化に貢献してきた。さらに、粉体技術をベースに環境リサイクル関連分野に取り組み、数々の納入実績を提供してきた。

そこで、環境保全技術の特殊な例として汚染土壌修復技術として、1992年9月に納入した真空乾燥溶剤回収装置について紹介する。さらに、環境リサイクル技術として、汚泥再資源化技術について1995年9月に納入した、し尿汚泥コンポスト化設備のために設計した50m³発酵槽：ナウタミキ

*ホソカワミクロン株式会社 粉体システムカンパニー
エンジニアリング部
(〒173-0004 東京都板橋区板橋3-9-7)
Tel.(03)5248-5700 Fax.(03)5248-5709

サーNX-500型について紹介する。

2. 汚染土壌修復技術

(1) 土壌汚染の現状

土壌は、大気、水と共に環境の重要な構成要素であり、生態系を維持するための基盤として、また、物質循環の要として重要な役割を担っている。しかし、近年、我が国では土壌汚染が顕在化する例が多くなっている。このような土壌・地下水汚染の多くは、化学工場などで適切な廃棄物処理が行われていなかったため発生している。60年代から社会問題化した重金属汚染であり、最近では、半導体工場や金属加工工場で利用されている、トリクロロエチレンなどの「有機塩素系化合物」による汚染である。1994年に環境庁より公表された“土壌汚染対策の実施状況等に関する調査結果”では、土壌汚染事例 315件が報告されている。これも当然なが水山の一角であり、最近問題視されている有機塩素系溶剤による土壌・水質汚染だけでも数千カ所と言われている。(図1.1,1.2)

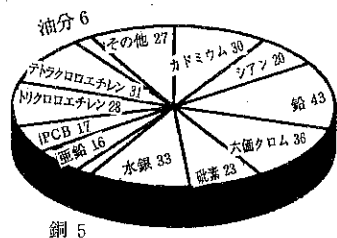


図1.1 土壌汚染の現状 汚染物質別 (315件)

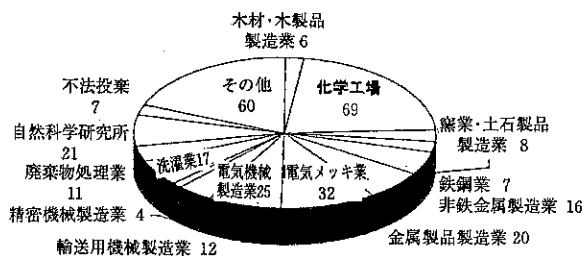


図1.2 土壌汚染の現状 業種別 (315件)

(2) 汚染土壌浄化技術

土壌・地下水汚染の浄化を行う場合に重要なことは、汚染サイトの地下構造、地質と汚染物質の種類と量と範囲を的確に把握し、状況に応じた適

切な修復技術を採用することである。すなわち、汚染物質のサンプリング・分析から修復計画の策定まで包含する「総合的なアセスメント」が必要である。また、汚染対策を行う場合、ひとつの修復技術だけによる浄化は困難であり、複数の修復技術をその特徴に応じて使い分けなければならない。その修復技術には、拡散防止技術と除去・分解技術があります。拡散防止技術は、汚染物質の溶出防止または地下水流れの制御を目的とするもので、簡易遮蔽、固化（物理・化学）技術が属する。除去・分解技術は汚染した土壌・地下水から汚染物質を系外に取り除くか、あるいは分解し無害化することにより浄化するもので、真空抽出法、地下水揚水法、高温加熱法及び微生物処理法がある。

① 溶融・固化法：汚染土壌中 (IN-SITU) に電極を挿入し、通電することによりジュール熱を発生させ、この熱により土壌を溶融させ、揮発性物質は、オフガスとして回収処理される。土壌を2000℃近い高温で溶融するため、有機化学物質を完全に分解し無害化する。得られるガラス固化体は極めて安定で有害物質を封じ込めることができる。(図2)

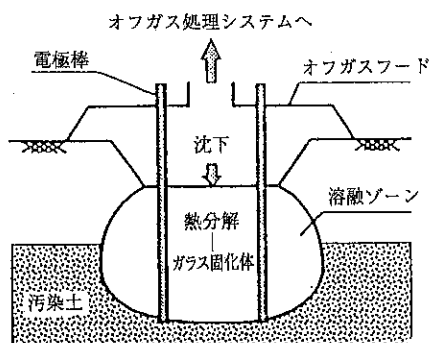


図2 溶融固化法概要図

② 真空抽出法：揮発性汚染物質を浄化するために、汚染区域内に井戸を設置し、真空ポンプで内部を減圧、有害物質をガス中に抽出した後地上で回収・除去する。また、汚染された地下水も、水中ポンプで汲み上げ処理して無害な物質として放出・放水する。(図3)

③ 加熱脱着法：汚染土壌を掘削 (EX-SITU) 土壌を熱風乾燥や加熱処理することにより、汚

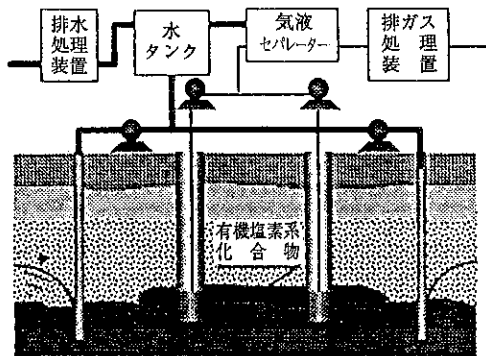


図3 真空抽出法の概要図

染物質の除去・回収を行うものである。掘削範囲を適切に設定すれば、処理効果は確実で短期間に処理できる。

- ④ 微生物分解法（バイオレメディエーション）：土壌中に生存するバクテリアを利用して有機汚染物質を分解する技術である。原位置（IN-SITU）処理が可能であり、比較的低コストであるが、分解生成物やバクテリアの毒性の問題や、高濃度汚染に対する効率性等の課題がのこされている。（図4）

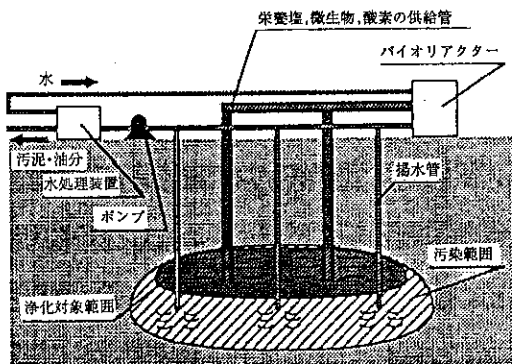


図4 微生物分解法の概要図

(3) 土壌真空乾燥装置

1991年9月、汚染土壌処理設備の引き合いがあり、当社テストセンターにおいて真空乾燥機、ナウタミキサNX-1型でテストを行い、汚染物質が除去できることを実証した。その設備概要を示す。（図5）

① 設備概要

- 1) 目的：工場跡地の汚染土壌を3年以内に無

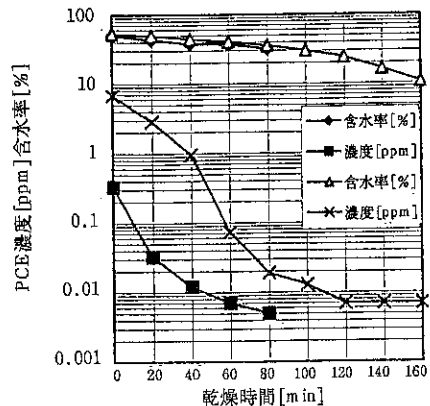


図5 NXV-1真空乾燥テストデータ

害化処理し、汚染源の流出拡大、地下水の汚染防止を目的として、速やかな環境基準値への回復を図る。

2) 汚染物質・濃度：

テトラクロロエチレン（PCE）

0.01～9.3mg/l 目標値 0.01mg/l 以下

トリクロロエチレン（TCE）

0.03～0.4mg/l 目標値 0.03mg/l 以下

3) 処理対象土壌量：20,000m³

含水率 約70%

4) 処理期間：'92年10月～'95年9月

（3年間）

5) 装置規模：設置場所13.5m×36m×8mH

② テストフローおよび実験結果

- 1) テストフロー：真空型ナウタミキサーNXV-1型、容量100L
- 2) テスト方法：汚染土壌を約60kg投入、真空乾燥を行い、経時時間毎サンプリングして測定した。
- 3) テスト結果：PCE濃度の経時変化を示した。
- 4) 考察：真空乾燥により、汚染土壌のPCE濃度は規制値0.01ppmをクリアできた。

③ 処理設備比較

（表1参照）

④ 汚染土壌処理設備フロー

本設備のフロー図を図6に示した。掘削は、事前調査により作成した汚染地域マップに従

表1 処理設備比較表

No	処理方法	機 種 名	イニシャルコスト	ランニングコスト	設置スペース	評 価
①	真空乾燥	ナウタミキサ	中	小	小	最良
2	間接加熱	スチームチューブドライヤ	大	大	大	熱効率悪い
3	焼却炉	ロータリーキルン	大	大	大	コスト・スペース不可
4	固定床炉	ボルテックス	中	大	中	排ガス処理問題
⑤	真空抽出	N S T エンテック	小	小	小	良

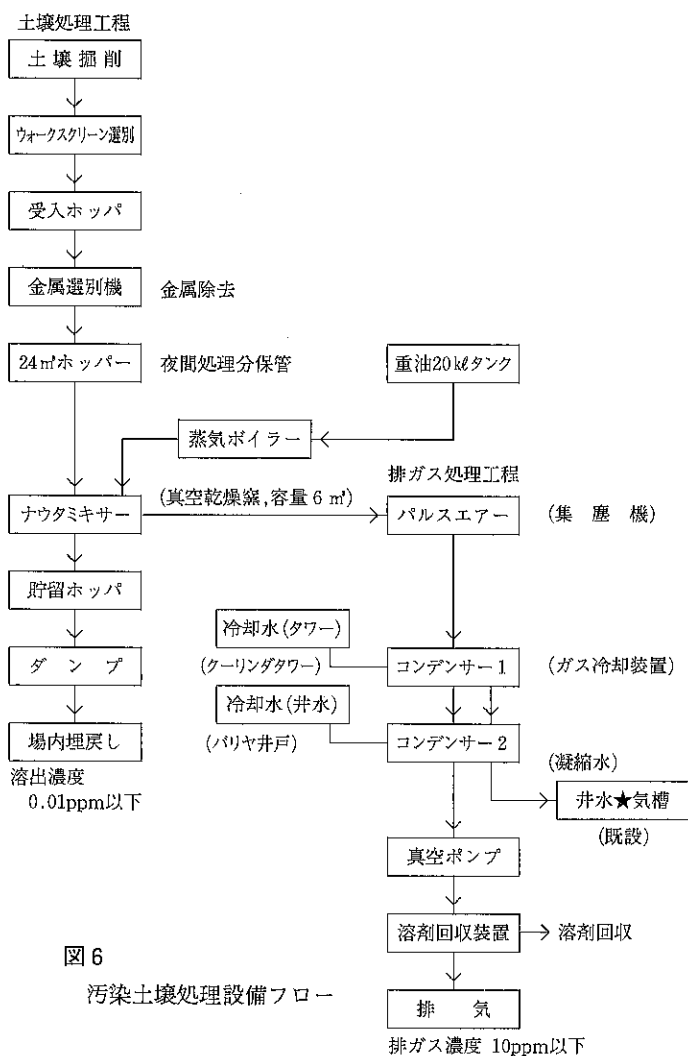


図6 汚染土壌処理設備フロー

ベルトコンベアーに定量供給して、金属検出器により金属除去した土壌を24m³ホッパーに貯留する。真空乾燥機ナウタミキサNXV-60型 容量6m³へ投入する。投入完了後、投入弁を閉めて真空ポンプで吸引して、系内を減圧にする。ナウタミキサ内の汚染土壌は自・公転するスクリュウにより混合攪拌され、スチーム加熱されたジャケットより熱を与えられ品温を上昇する。減圧下で加熱された低沸点の汚染物質(PCE, TCE)は蒸発してコンデンサーで凝縮液として回収され、既設の井水曝気槽へ移送され処理される。また、コンデンサーで気・液分離されたガスは真空ポンプより排気され、溶剤回収装置(活性炭吸着式)でPCEとTCEを脱着回収して、排ガス濃度10ppm以下にして大気に放出する。排ガス濃度を自動サンプリングしてガスクロマトグラフィーで測定して、記録する。

浄化された土壌はナウタミキサより排出され搬送コンベアで貯留ホッパーへ移送される。貯留ホッパーより排出される浄化土壌はダンパへ積載して工場内へ埋め戻しされる。

い、汚染土壌のみを採集する。

今回工場跡地のため掘削土壌中にコンクリート、砂利や鉄筋などの異物が含まれていたため、ウオークスクリーンで篩分選別して汚染土壌のみを工場内へ運搬、貯留する。1日処理分を受入ホッパーへ投入して、供給フィーダにより

⑤ 試運転結果 (表2参照)

1992年9月、火入れ式後、試運転開始し、色々なトラブルを経験し、改造改良をして11月には竣工報告会を開き、12月より本稼働を開始した。以来、3年間で処理を終えて、1996年1月には、解

表2 試運転データシート

月 日	原 料			処理時間 [hr]		運転結果 PCE濃度 [ppm]				判定
	種別	水分	投入量	真空	熱風	水分	汚染	浄化	排気	
10/8	黒土	43%	5.5T	4	1.5	15.1%	0.0035	0.001	—	○
10/9	黒土	41%	5.0T	4	0.5	15.4%	0.1252	0.001	—	○
10/15	黒土	41%	4.0T	3.5	1.0	20.7%	0.4987	0.013	—	△
11/18	白土	46%	4.0T	5	1.0	6.5%	0.031	0.004	0.473	○
11/19	白土	43%	2.8T	4.5	1.0	18.5%	0.277	0.005	0.629	○

体撤去して、完全に環境基準へ戻すことができ、本プロジェクトは完了した。

3. 汚泥再資源化技術

(1) 廃棄物処理の現状

近年、生活レベルの向上と多様化、産業活動の活発化により廃棄物量が年々増大している。平成8年度厚生白書によれば、平成4年度の産業廃棄物排出量は約4億300万トンであり、一般廃棄物排出量5020万トンの約8倍に相当する。また、最終処分量は約8,900万トンであり、一般廃棄物最終処分量1,530万トンの約6倍である。再生利用量は16,100万トンで40%であり、一般廃棄物については410万トンで8%であった。第8次廃棄物処理施設整備計画(H. 8～12率) 5兆500億円の予算を計画している。その目標は「リサイクル型社会への転換推進計画」で重点施策は、①ごみ排出抑制・排出時の分別収集、②リサイクルの推進と焼却時の熱利用、③産業廃棄物の適正処理です。我が国の廃棄物の処理方法は廃棄物量の約75%が焼却処分となっている。天然資源の枯渇が叫ばれる中、大量の石油資源を使い大気汚染物質であるダイオキシンを放出しながら、その焼却灰は最終処分地に埋め立てられるのが現状である。そこで、廃棄物の再利用・再資源化、いわゆるリサイクル技術が要望されている。産業廃棄物量で最も多い汚泥(45%)の処理方法として、発酵技術を利用したコンポスト化は省資源・省エネで環境保全型の技術として注目を浴びている。(図7.1,7.2,7.3)

(2) コンポスト化技術

① 目 的：

し尿や下水を浄化処理する際に発生する汚泥

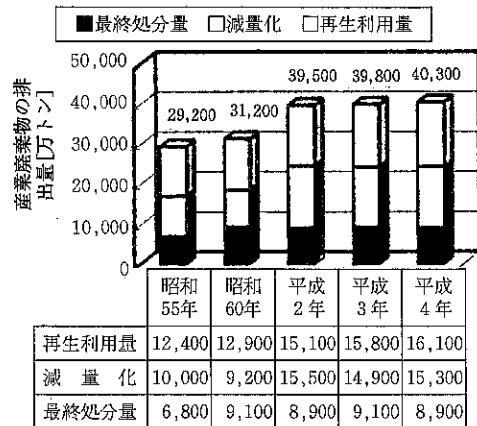


図7.1 産業廃棄物の総排出量の推移

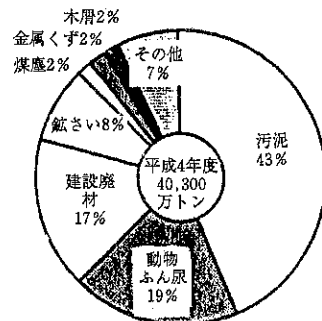


図7.2 産業廃棄物の種類別排出量

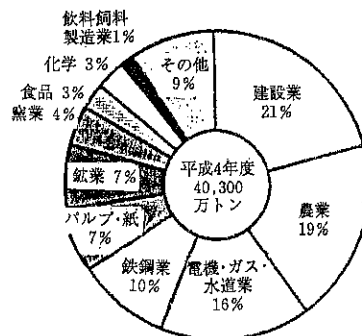


図7.3 産業廃棄物の業種別排出量

は、多量の有機物と各種の無機成分を含んでいるため、肥料効果や土壌改良効果は大きいですが、80%に達する水分や悪臭、汚物感の利用の妨げとなっている。汚泥のコンポスト化処理は好気性細菌の働きにより、有機物を分解し、その際に発生する発酵熱で、殺菌、臭気を除去し、減量化させて取り扱いを容易にすることができる。

② 原理と特徴：

自然界の有機性廃棄物は土壌中の微生物により分解処理される。この微生物には酸素を必要とする好気性細菌と酸素を必要としない嫌気性細菌と環境条件により変化する通性嫌気性細菌がいます。これらの細菌の働きにより有機物を分解して、二酸化炭素と水に分解し、自然界の循環サイクルシステムを形成してきた。(図8)

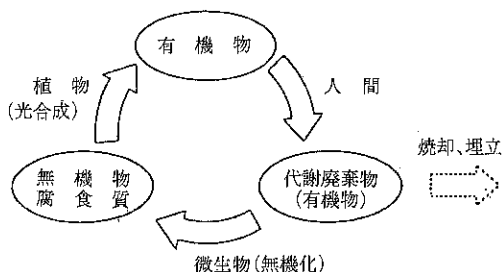


図8 自然界での物質循環概念図

コンポスト化とは、汚泥を好気性の条件下で堆積させ、好気性微生物の働きにより有機物を酸化分解あるいは無機化し、最終生成物として、生物学的に安定な腐殖質と無機質が生成し、同時にその過程において発生する発酵熱で病原菌や寄生虫卵を死滅させ、臭気を除去し、水分を蒸発させ減量化を行うものである。(図9)

その物質収支を示すと、水分72%、有機分

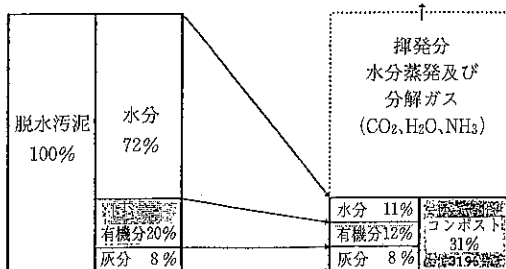


図9 コンポスト化過程

20%、灰分8%の脱水汚泥をコンポスト化すると、水分11%、有機分12%に減量される。

強熱減量は有機分と灰分の割合で、71.4%から60%になり、有機物分解率40%となります。

コンポスト化過程は一次発酵と二次発酵の二つの段階に大別される。(図10)一次発酵では比較的単純な構造の易分解性有機物が主に分解され、二次発酵では複雑な構造の難分解性有機物が分解される。分解の際に熱が発生し、温度は60~80℃にも達しその際に水分を蒸発し、炭酸ガスやアンモニアガス等を発生する。発酵初期段階では中温微生物が優先的に易分解性有機物を急速に分解するため、その時の発酵熱によって温度は急激に上昇し、さらに活発に呼吸するため、周辺の酸素を取り込みCO2を排出するため、CO2濃度が上昇する。発酵温度が40℃以上になると、高温性微生物が優性となるためNH3が生成され、60℃以上になると、活性を失い胞子を形成する。

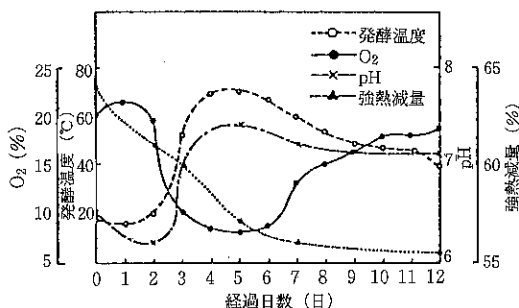


図10 一次発酵中の状態変化

胞子を形成しないものは死滅する。分解作用が進行して有機物が減少してくると活性を失い、発酵熱は下がる。この時、未分解有機物が残っていれば切返しをすると温度は再び上昇する。これまでの段階が一次発酵で、これに要する日数は7~14日程度である。一次発酵を終えた堆肥の中にも未分解有機物があり、これを分解する二次発酵は2~3週間程度かかる。

③ 発酵装置の操作条件

コンポスト化の発酵過程は衛生面、分解速度の点から好気性発酵としなければならない。嫌気性発酵は分解時間が長く、臭気を発生するだけでなく発酵温度が低いため殺菌効果がない。好気性発酵をさせる必要条件として、好気性細

菌が多く存在し、それらが活動しやすい環境を維持することが重要である。そのためには、

- 1) 微生物の種付け、2) 原料含水率の調整、
- 3) 吹込み空気量の調整、4) 切り返し操作、
- 5) 発酵温度の維持管理などの操作が必要である。

④ コンポスト化設備

コンポスト化設備の要件として、1) 汚泥受入設備、2) 混合装置、3) 発酵槽、4) 通気設備、5) 搬送設備、6) 造粒・篩分装置、7) 計量・包装設備、8) 脱臭設備、である。

(図11.1,11.2,11.3,11.4,11.5,11.6)

これらの中で、中心的役割は発酵槽である。発酵槽の形式と種類を示す。

1) 堆積型発酵槽：

- (Ⅰ) ショベル式、
- (Ⅱ) うねみぞ式

2) 横形発酵槽：

- (Ⅰ) バドル式
- (Ⅱ) スクープ式
- (Ⅲ) オーガ式
- (Ⅳ) 円形オーガ式
- (Ⅴ) 横形回転式

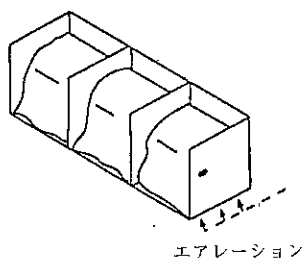


図11.1 ショベル式発酵槽¹⁶⁾

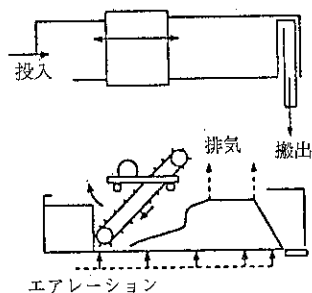


図11.2 スクープ式発酵槽¹⁶⁾

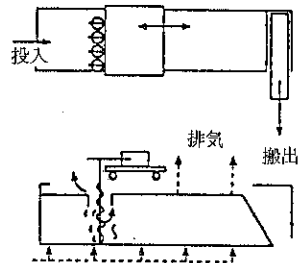


図11.3 オーガ式発酵槽¹⁶⁾

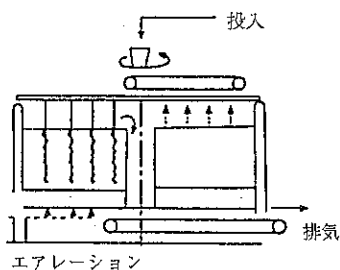


図11.4 円形オーガ式発酵槽¹⁶⁾

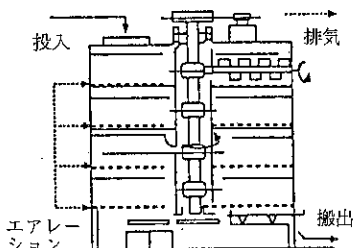


図11.5 多段バドル式発酵槽¹⁶⁾

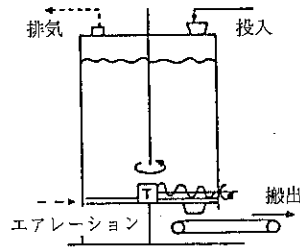


図11.6 サイロ式発酵槽¹⁶⁾

3) 縦型発酵槽：

- (Ⅰ) 多段バドル式
- (Ⅱ) 落し戸式
- (Ⅲ) 移動床式
- (Ⅳ) サイロ式

(3) コンポスト化設備納入事例

1994年11月より3カ月間、テスト機ナウタミキサNX-1型(容量100L)を高松衛生処理センター内に持ち込み、生汚泥を投入してテストを行い、発酵することが確認できた。さらに、1995年10月～1996年12月まで、同センター内へパイロットプラントDBX-600型(容量600L)×2基を設置してテストを行った。実機50m³発酵槽の運転操作条件を推算するためのデータ収集と、各種操作因子に関するテストデータを収集を行った。

1995年9月納入した、50m³発酵槽/ナウタミキサNX-500型(国内実績最大)の概要と1996年3月より試運転した結果を示します。

1) し尿処理施設の概要

名 称：新倉屋敷クリーンセンター/諫早市

ほか7町立保険環境組合

着 工：平成6年2月

竣 工：平成8年3月

処理方式：高負荷脱窒素処理方式＋高度処理
(砂ろ過・活性炭吸着)

処理能力：133KL/日 (生し尿, 126KL/日, 浄
化槽汚泥, 7KL/日)

脱水汚泥量：6.7T/日 堆肥化量＝2.3T/日

設計・施工：株式会社 クボタ

2) 発酵槽 設計仕様

- (I) 発酵槽の型式：堅型移動回転軸方式 ホソ
カワ/ナウタ ナウタミキサ NX-500型
- (II) 発酵槽の容量：有効50m³×2槽
- (III) 運転方法：No.1発酵槽へ脱水汚泥を投入
し, No.1発酵槽汚泥はNo.2発酵槽へ投入
する, 2槽直列運転を行う。
- (IV) 投入汚泥量・性状：脱水汚泥：6,600kg/日,
含水率72±2%, 見かけ比重：0.8T/m³
No.1発酵槽汚泥：2,500kg/日, 含水率
：45±5%, 見かけ比重：0.7T/m³
- (V) 運転状況：汚泥含水率が30～72%まで変動
し, 状態変化が有り, 内部温度80℃まで上
昇する。発酵用吹込み空気量 (Max25m³
/min) が入り, 均一分散が可能のこと。
- (VI) フローシート：搬入されたし尿と浄化槽汚
泥は前処理工程で石や砂を除去, さらに紙
やビニールなどを取り除いて, し査として

焼却処分される。1次・2次処理工程で有機
物 (BOD) と窒素化合物を除去し, 微生
物処理した後, 固液分離された汚泥は脱水
機へかける。含水率72%の脱水汚泥はホッ
パーへ移送され, 全量がNo.1発酵槽へ投
入される。投入された高水分の汚泥は発酵
槽内の汚泥と混合攪拌され, 最適な含水率
になり一次発酵が促進される。一定期間の
滞留の後, No.2発酵槽へ移送される。未
発酵の汚泥が完全に分解された完熟堆肥は
製品ホッパーへ移送され, 製品包装されて出
荷される。

3) 試運転結果および考察

1996年6月1日から11月16日までの運転デー
タを下図に示した。No.1発酵槽に種汚泥を約5ト
ン投入し, 脱水汚泥を徐々に所定量を投入して,
発酵状態を確認しながら汚泥量を増やしてい
き, 7月中頃には定格重量の35トンに達した。同様
にNo.2発酵槽にもNo.1より一次発酵を終えた汚
泥を移送し, さらに脱水汚泥を投入していき7月14
日には製品コンポストを排出した。8月中頃には
No.2発酵槽も定格量になり, 定常状態になった。
次に, 6月から11半月の汚泥処理量とコンポ
スト生産量を示した。

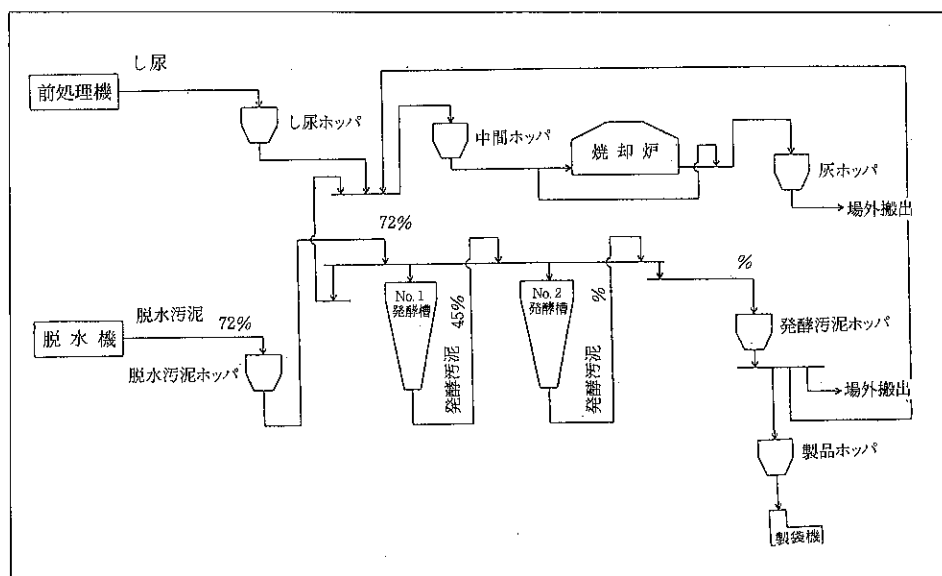


図12 コンポスト設備フロー

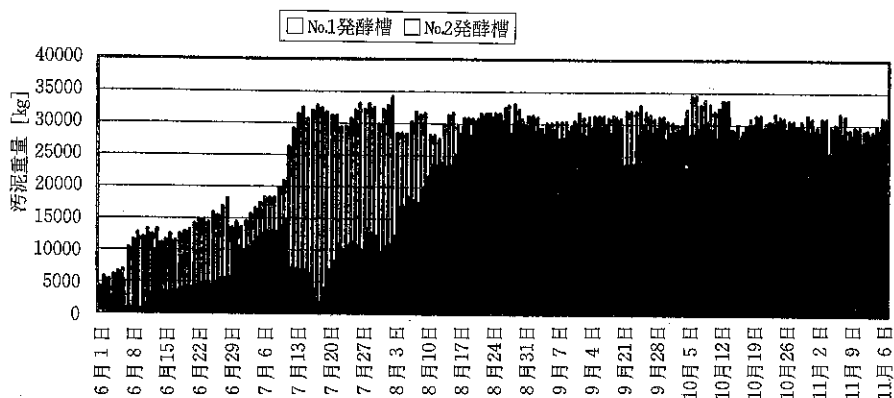


図13.1 発酵槽 重量変化

表 運転管理指標

項 目	脱水汚泥	No. 1 発酵槽	No. 2 発酵槽	操 作 条 件
品 温 [℃]	20	60	50	吹込空気量の調整, 切返, 汚泥投入
含 水 率 [%]	75	40	35	吹込空気の調整, 品温の上昇
強熱減量 [%]	74	64	63	発酵条件を整える, 品温の制御
粒 径 [mm]		~φ20以下	~φ10以下	含水率の制御
臭 気	アンモニア臭	コンポスト臭	コンポスト臭	吹込空気量の調整
色	黄土色	黒灰色	黒灰色	発酵条件を整える

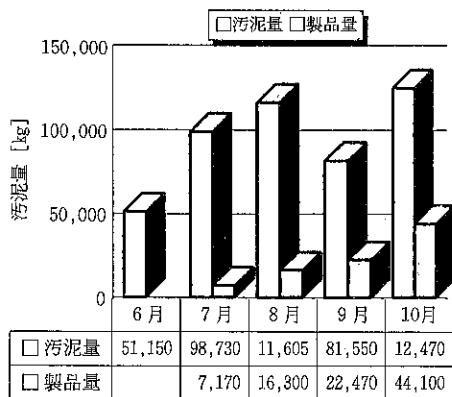


図13.2 コンポスト設備, 汚泥処理と生産量

4. 結 言

最近の廃棄物処理回収事例として, 汚染土壌処理設備と汚泥再資源化設備を紹介した. その中で, 有機塩素系溶剤の漏洩による汚染土壌の修復のため, 真空型ナウタミキサによる真空乾燥装置を設備して, 約3年間で地下水の環境基準値をクリアした. 環境保全のため, 長期間高額の費用を投じて, 世の中で初めての試みである工場跡地の汚染土壌を掘削して全量を無害化処理して埋め戻

すという, 汚染土壌修復技術を確立した.

汚泥再資源化設備については, 廃棄物最の中で最も多い汚泥の処理方法としてコンポスト化して再生利用することは環境リサイクル技術として注目されている. コンポスト化設備の中で最も重要な装置は発酵槽であるが, 国内実績最大のナウタミキサを50m³発酵槽として開発し, アプリケーションした.

粉体の混合を目的として開発されたナウタミキサは粉体技術のみならず環境保全技術への適用が可能であり, その範囲も大きく広がると思われる.

最後に, 汚染土壌処理設備については, 機密保持契約も有り, 詳細データは省略する. 1996年1月には解体撤去工事も完了し, ご協力頂いた関係各位に深く謝辞を表する.

また, 汚泥再資源化設備に関しては, ㈱クボタ殿との共同研究であり, 研究成果である詳細データをいただき, ここに深く感謝の意を表する.

高温集塵を中心とする粒子分離

金岡 千嘉男*

Chikao Kanaoka

はじめに

粒子状製品などの有用物質の回収や大気汚染防止などの目的で用いられることが多い集塵装置はほとんどの場合200～300℃以下で運転されている。これは装置材料等の耐熱性に制約があるためである。粉塵を含む高温ガスは化石燃料の燃焼や各種工業プロセスで発生するが、その大半は高温のまま環境中に放出されている。しかし、高温ガスは大きな顕熱を持つので、もし、高温での集塵が可能となれば、ガスのもつ熱エネルギーの効率的な回収利用が可能となり、しかも利用後のガス温度は当然下がっているの、環境への熱負荷の低減にも寄与する。さらに、集塵プロセスの簡略化にもなる。このことはまた、懸濁微粒子を取り扱う各種化学プロセスにも適用すれば、新しい効率的かつ省エネ型のプロセス開発が可能となることを意味している。そこで本稿では高温での集塵技術の現状と今後について概観する。

1. 粒子分離へのニーズ

高温集塵は、粉塵を含む高温ガスを伴うプロセスで必要とされる。代表的なものとして、石炭を利用する発電技術や工業原料としては水素ガス合成プロセス、重質油を触媒により分解して分解ガ

ソリンを得る流動接触分解（FCC）プロセス、鉍石の焼結、コークス製造、高炉、転炉などの高温含塵ガスの発生源の多い製鉄プロセスなどがある。また、最近大きな問題となっているゴミ焼却に伴うダイオキシンの排ガスにおいても触媒作用が指摘されている粉塵を高温で集塵できれば、ダイオキシンの排出量の削減と熱エネルギーの有効利用が可能となると考えられている。発生ガス量としてはそれほど多くはないが、自動車排ガス処理や放射性廃棄物焼却処理施設のように空間的制約や危険区域の低減などを必要とする場などへも適用が可能となるなど、高温集塵を必要とする分野は広い。代表的なプロセスについて簡単に紹介する。

1.1 石炭利用高效率発電

火力発電効率の向上を目指すものであり、加圧流動床燃焼（PFBC、図1）、石炭ガス化複合発電（IGCC）、これら両者を組み合わせたトッピングサイクル、微粉炭直接燃焼方式などの研究開発が進められている。表1に示すように、いずれも高温高压の燃焼ガスあるいはガス化ガス中には高濃度のダストが含まれるので、ガスタービン翼保護のため、導入前に除去するために必要となるものである。

1.2 流動接触分解プロセス（FCC）

重質油を流動化している触媒と接触することにより分解して分解ガソリンを得るプロセスであ

*金沢大学大学院 自然科学研究科
(〒920-8667 金沢市小立野2-40-20)
Tel.(076) 234-4645

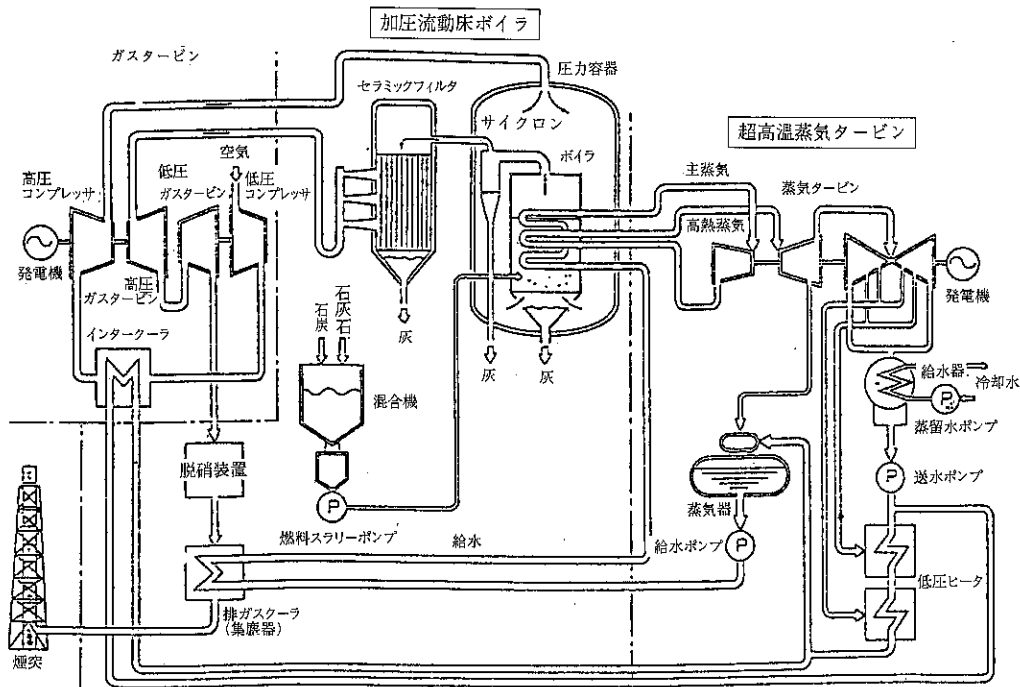


図1 加圧流動床燃焼複合発電実証プラントフローチャート (電発, 若松)

表1 IGCCおよびPFBC排ガス特性の比較

特性値	IGCC	PFBC
温度 (°C)	400-500	800-900
圧力 (ata)	20-30	8-15
ガス流量	小	大
粒子径	小	大
炉出口粉塵濃度 (g/m ³ N)	20-25	15-30
粗集塵装置出口粉塵濃度 (g/m ³ N)	2-3	2-3
集塵速度	小	大
ガス雰囲気	還元	酸化

る。FCCからの排出ガスからは700~750℃, 2~3気圧の燃焼排ガスが放出されている。その熱エネルギーの一部は排熱回収ボイラで回収されているが、ガス中には図2に示すように比較的大きな触媒粉が数g/m³の高濃度で含まれているため、ダストによる磨耗がFCCガスエキスパンダの機器寿命を左右する。このため、図3のようにFCCと廃熱回収ボイラの間での粒子除去が必要

となるものである。このシステムでは流入粒径が比較的大きいので、集塵装置としてはマルチサイクロンが用いられ、10μm以上の粒子除去が行われている。

1.3 製鉄プロセス

転炉ガス生成工程プロセス 溶銑中への酸素吹き込みにより発生するCO75%を含む高温含塵ガス(温度1500℃, 粉塵濃度数g/m³)の集塵は、現在、2段ベンチュリスクラバで湿式処理している

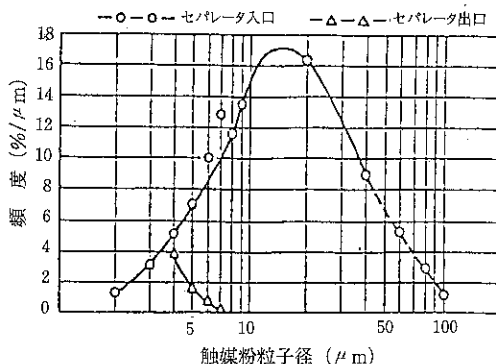


図2 流動接触分解装置から流出する触媒粒子の粒子径分布

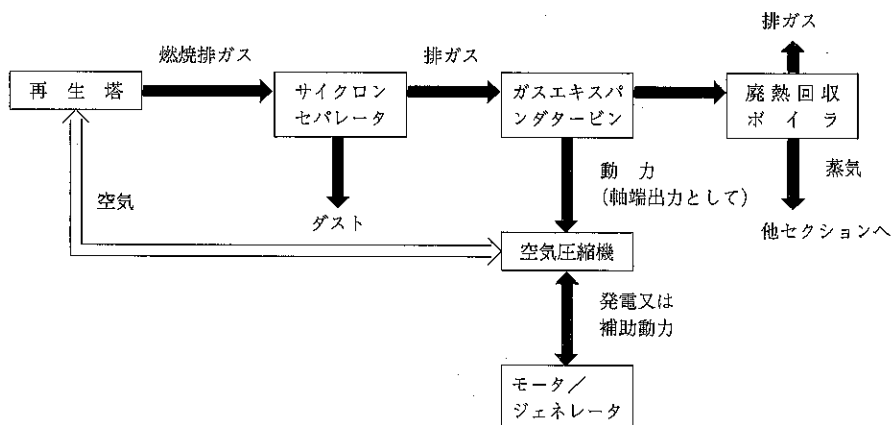


図3 流動接触分解装置での動力回収の概念

が、乾式の高温集塵ができれば経済効果は大きい。ただ、現存の装置の場合、転炉、(20m)、ベンチュリスクラバ(30m)を垂直、直列に配置した大型装置であり、簡単には装置の置き換えることは困難なので、新設することがあればメリットは大きいと考えられる。

鉄鉱石焼結過程冷却空気からの排熱回収 冷却後の高温空気(300~400℃)からの廃熱回収ではプレダスターしか使用していないので、伝熱管の摩耗が避けられない。したがって、空気中に懸濁する高濃度粉塵(鉄鉱石を主成分とする普通ダスト、10~20g/m³)による伝熱管の磨耗防止用高温集塵装置への要請がある。

溶融還元製鉄法(DIOSプロセス) 粉・粒状の一般炭、鉄鉱石を直接使用する新プロセスである。図4のように、一般炭は直接または脱揮処理した後、鉄鉱石は流動層により予備還元して、溶

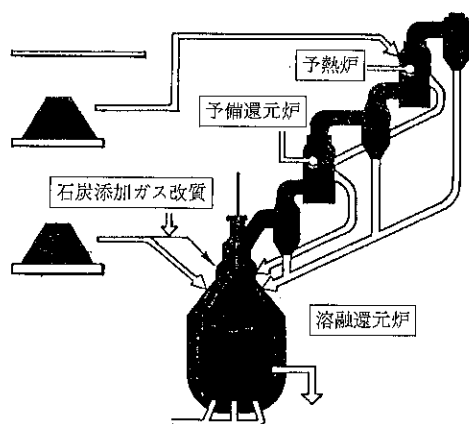


図4 溶融還元製鉄プロセスフローチャート

融還元炉に装入し、溶銑を生産する技術であり、従来法のように粘結炭、鉄鉱石の塊成化が不要となるので設備コスト、エネルギーコストの削減が期待できるが、最も重要な点は、予熱炉出口ガス(300~400℃)の有効な集塵の成否を握っているといわれている。

2. 粒子分離の分類と特徴

集塵装置の粒子分離方式は、図5に示すようにおおまかには三つに分類できる。

- (I) 流通形式：粒子に何らかの外力を作用することにより、粒子を流れの系外に移動させる。捕集性能は時間的にそれほど変化せず、圧力損失は基本的に処理ガスの流通抵抗のみである。
- (II) 障害物形式：球、円柱などの障害物を気流中に設置することにより粒子を分離する。分離された粒子は障害物の集合体内に残るので、捕集性能は時間とともに向上するが、同時に処理ガスの流通抵抗を増す。しかし、分離された粒子の除去は一般に困難で、使い捨てられることが多い。
- (III) 隔壁形式：布や多孔質体など気体は通すが粒

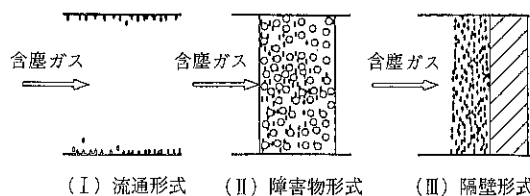


図5 集塵装置による粒子分離の形式

子はほとんど通さない捕集体を流路を遮るよう配置することにより、粒子を捕集体表面に分離する。捕集体表面に堆積した粒子を除去することにより捕集体を再生し、連続運転を行う。

このうち、ⅡとⅢは流れをさえぎることにより粒子を分離するのは同じであるが、Ⅱでは粒子は障害物帯の内部で分離されるのに対し、Ⅲでは大部分の粒子はすでに捕集され捕集体上に堆積している粒子に捕集される点異なる。

流通形式は流路中に障害物を挿入せず、気流と直角方向に重力、遠心力、静電気力などの外力を作用し、流路より粉塵を除去する集塵方式である。重力集塵、遠心力集塵、電気集塵などがこの形式に属する。この方式では流路内に流れをさえぎるものがないので、気流の流通抵抗が小さく、同一処理速度では圧力損失が非常に低いのが特徴であり、集塵率Eは気流の流動状態によるが、粒子の移動速度 v 、捕集面積 S と処理流量 Q をも用いて以下のように表現できる。

$$\text{層流} \quad : E = vS/Q \quad (1)$$

$$\text{断面内で完全混合} : E = 1 - \exp(-vS/Q) \quad (2)$$

$$\text{装置内で完全混合} : E = 1 / (1 + Q/vS) \quad (3)$$

図6にこれらの式から得られるEの計算結果を示す。図より明らかなように、Eは粒子混合のない層流の場合が最も高く、混合度合いが強くなる、断面内完全混合、装置内完全混合の順に小さくなっている。実際の装置では、全く乱れがなかったり、逆に完全に混合していることはなく、

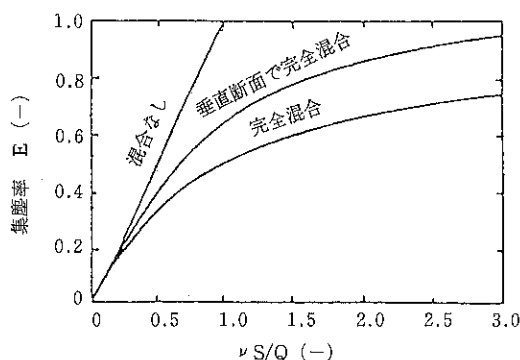


図6 流通形式集塵装置の集塵率に及ぼす粒子混合度の影響

中間的な状態なので、流通形式の集塵装置の集塵率は図中の上下2つの曲線の間の値となる。また、式(1)~(3)は全く異なる混合状態に対して求めたものであるが、いずれも vS/Q のみの関数となっている。したがって、流通形式の集塵装置の集塵率は vS/Q と粒子の混合度により、ほぼ決定できる。

また、多くの集塵装置がこの分類に属す、障害物形状の集塵率Eは一般に次式で表現される。

$$E = 1 - \exp \left\{ -A/v_c (\alpha / 1 - \alpha) \eta L \right\} \quad (4)$$

A/v_c は障害物の形状と配置により定まるが、円柱および球の場合は以下ようになる。

$$A/v_c \begin{cases} = 4/\pi D_c & \text{円柱} \\ = 3/2 D_c & \text{球} \end{cases} \quad (5)$$

一方、隔壁形式では、粒子はおもに捕集体表面に堆積した粒子層により捕集されるので、粒径によらず集塵率は99%以上と非常に高い。

粒子の捕集形式としては上述のとおりであるが、Ⅰの形式ではサイクロンと電気集塵装置、Ⅱでは粒子充てん層フィルタ、Ⅲでは各種セラミックフィルタが高温集塵装置としての可能性が検討されている。

2.1 サイクロン

数十 μ m以上の比較的大きな粒子の除去装置として使用されることが多いが、構造が簡単で稼働部がなく、しかも高濃度含塵ガスの処理も可能なので材質を選べば高温・高圧集塵に適用可能である。

サイクロンは高濃度含塵ガスの処理が可能なのでその他の精密集塵装置への負荷低減に適している。粒子分離特性は一般に胴径が小さい程よいといわれているが、操作変数が多いため経験にたよった研究が多い。図7にScarlettらが円錐部下部に更に短い直胴部を持つ胴径360mm、全長約170cmのサイクロン用いて行った実験結果を示す。部分分離効率は流速が速いほど高くなる点では常温での傾向と同様であるが、効率そのものは500℃の方が38℃より低く、温度がサイクロンの分離性能を低下させることが分かる。これは、粘度が温度と共に上昇するためである。また、サイ

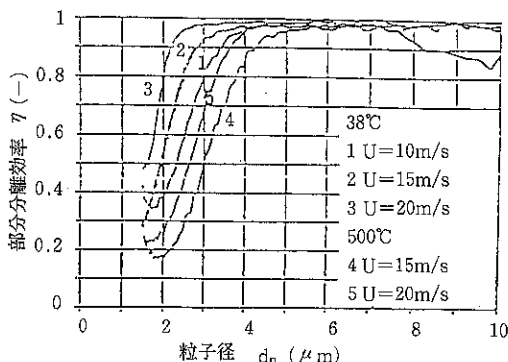


図7 部分分離効率及ばす温度及び入口速度の影響

クロン性能を低下させる大きな要因に内部、特に壁近傍での流体の渦運動がある。このため、サイクロン壁を流体旋回方向に回転させたり、壁面にポケットを付けることにより渦による粒子飛散を防ぐ工夫に関する研究がある。

2.2 濾過集塵

セラミックフィルタ、粒子充填層、金属繊維充填層等で気流をさえぎることにより懸濁粒子を捕集する方法である。この方式は濾材を選べば高い集塵率が得られるので、実用化に対する期待が大きく、研究も多い。

(1) セラミックフィルタ

セラミック繊維を織布やフェルト状に加工したもの、焼結多孔質体としたものがある。織布は常温で使用されるバグフィルタと同様、柔軟な構造であり、捕集効率は高く、圧力損失が小さいなど

濾過集塵装置としての特性を備えているが、現在開発されている織布では引張強度、曲げ特性など機械的強度が高温域で急激に低下する致命的な欠点があり、その解決が今後の課題である。また、フェルト状に加工したフィルタはセラミック短繊維を成型したものである。多孔質フィルタに比べると圧力損失が低いので最近注目されているが、織布と同様、機械的強度に課題を残している。

多孔質焼結体には外面濾過を行うキャンドルフィルタ(図8a)と内面濾過を行うチューブフィルタ(図8b)および単位体積当たりの濾過面積をできるだけ大きくするために多数の流路組み合わせたクロスフローあるいはハニカムフィルタ(図8c)などがある。織布やフェルトと比べ機械的強度は非常に大きいので、実用化に最も近いフィルタである。このタイプのフィルタは粒径、温度によらず高い捕集効率を示し、高温域では粒径によらず、実質的に100%の効率となる。しかし、濾材自身の圧力損失が高いため、堆積粉塵の払い落としに大量の高圧気流を必要とし、しかも時間が経過すると捕集粉塵の侵入による焼結体の目詰まり、これに伴う通気性の低下と圧損の増加を招く。さらに、低温ジェット気流の吹き込み、装置のスタートアップ、シャットダウンに起因する熱衝撃によるフィルタの破損、付着未燃粒子の燃焼による破損、腐食性ガスとの反応侵食など重要な課題がある。したがって、払い落とし特性、圧力形成に関する研究、フィルタ寿命、再生法、濾材材

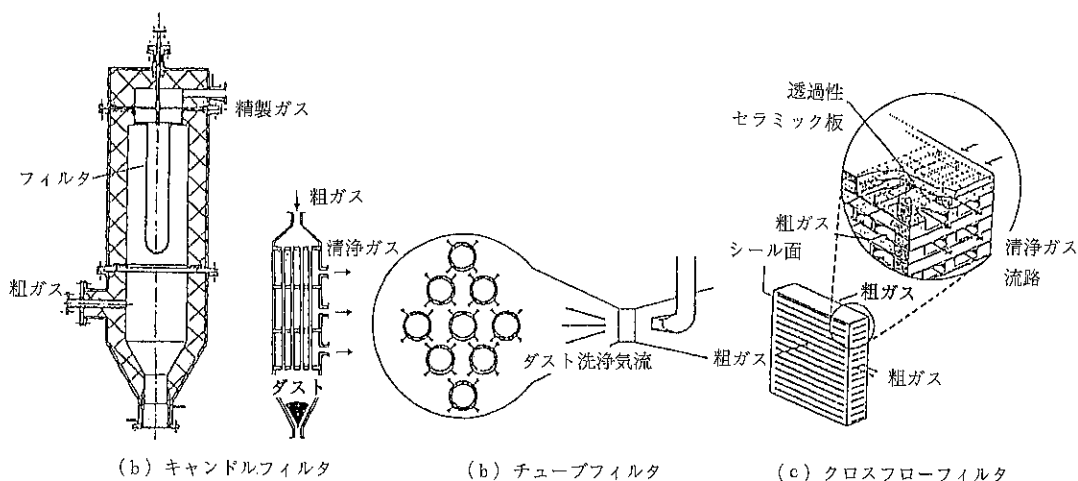


図8 セラミックフィルタ

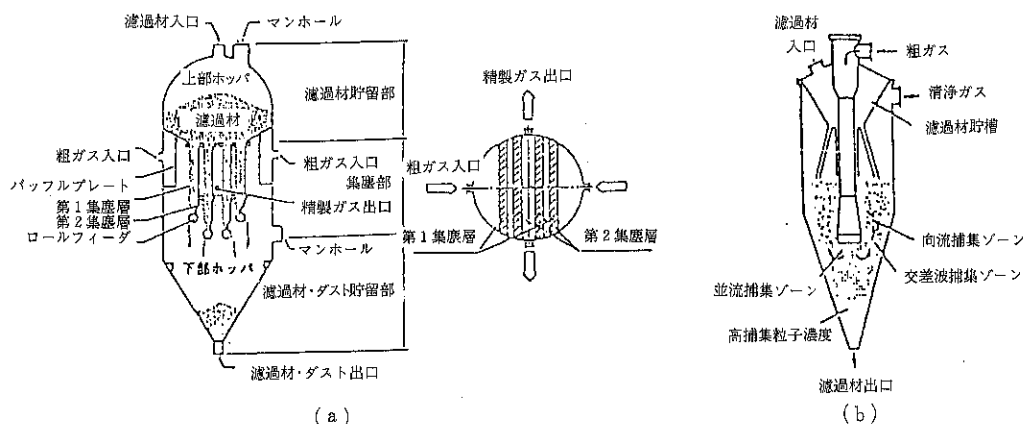


図9 粒子充填層フィルタ

質に関する研究が盛んに行われている。セラミックフィルタは発電技術だけでなく、高炉炉頂集塵、原子炉廃棄物処理工程などへの適用についても検討されている。

(2) 粒子充填層フィルタ

図9aに示すようにムライト、砂などの粒子状物質の充填層に含塵空気を流す方式と同図bに示す粒子充填層内に煙管を埋没するスクリーンレス方式がある。充填層に電場を形成し、静電気力による粒子捕集を行うこともあるが、通常は粒子は充填粒子間の隙間を通るときに、慣性、さえぎり、拡散などの機械的機構により捕集される。捕集粉塵は当然、充填層内に堆積し流路閉塞の原因となるので、それらを如何に捕集場から除去するかが重要な課題である。日本では移動粒子充填層フィルタが勿来で200t/dayのパイロットプラントでテストされてきた。現在では、粒子充填層は粒子を適当に選べば粉塵捕集とともにガスと粒子の同時除去の検討もなされている。

(3) 電気集塵装置

図10に電気集塵装置の概要を示す。この集塵装置は電場中で荷電粒子が反対極性電極方向へ移動する性質を利用して除塵するので、粒子とガスの性状により集塵性能は変わる。粒子に多くの帯電量を与えるには、電流量を高くする必要があるが、圧力は負に、温度は正に寄与する。また、高温ではガス粘度が増加するので、移動度は低下し、分離性能を低下するように作用する。また、電気集塵機は耐圧容器内に格納し、電力は外部から供給し、捕集ダストは容器内で槌打、排出しなければならないので、非常に困難を伴う。さらに、

操作温度が450℃程度のIGCCであれば、構造材に耐性があるが、PFBCガスのような高温ガスには現状ではほとんど使用できないと考えられる。いずれにしても、電気集塵では粒子の物性値とりわけ見掛け電気抵抗率の大小が粒子荷電、集塵特性に重大な影響を与えるので、これらに関する研究がみられる。

表1に示したようにIGCCとPFBC発生ガスの高温集塵において重要と考えられる主な特性値を示したが、温度的にはIGCCの方がかなり低い

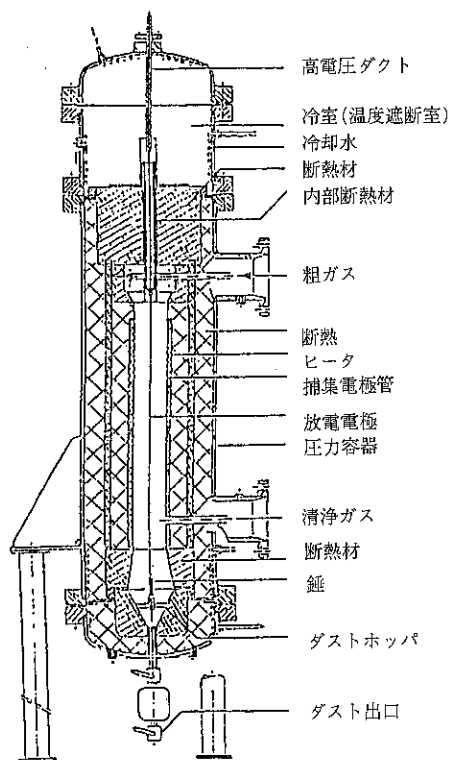


図10 電気集塵装置

が、対象圧力が極端に高く、ガスは還元性であるので粒子捕集以外にも解決しなければならない課題が多くあることがわかる。また、表2に主な高温集塵装置の特徴をまとめて示す。

表2 高温用集塵装置の特徴

集塵形式	長 所	短 所、課 題
サイクロン	簡単な構造、無可動部、低運転費	分離下限粒径大(数 μ m以上) 高温域での捕集性能低下
多孔質焼結体	高捕集性能	高初期投資額、高圧力損失、エレメントの割れ、耐久性耐食性、払い落とし特性装置の大型化
セラミックバグフィルタ	高捕集性能、低圧力損失	機械的強度の低下
セラミック繊維成型体	高捕集性能、低圧力損失、軽量	機械的強度 フィルタエレメントの破損(逆洗圧、熱衝撃、腐食)
粒子充填層	簡単な構造、低運転費	分離下限粒径大、捕集粒子の再飛散、濾材再生、輸送
電気集塵	高効率、低圧力損失	耐熱性、耐絶縁性、コロナ放電特性の低下

3. 高温集塵に関する研究の動向

高温集塵に関する国際会議は1986年に英国のSurrey大学で開かれたGas Cleaning at High Temperaturesが多分はじめてで、それ以降、1994年9月に2回が同大学、1996年9月に第3回がドイツのKarksruhe大学で開催されており、1999年9月に第4回がやはりKarksruhe大学で開催されることが予定されている。表3に過去3回の会議での発表論文を内容別に分類したものである。ただ、2回目までと3回目では大きく分類が異なるので正確さを欠くが、1回目はサイクロン、電気集塵、濾過集塵と幅広い集塵法が検討されていたが、2回目では濾過集塵とガス除去に重点が移つり、3回、4回目とその傾向が加速している。特にSO_x、酸性ガスやアルカリ成分は高温では反応性を増し、金属だけでなくセラミックも犯すので、その有効な除去も解決すべき課題なので、より高温での除去を可能とする触媒・素材開発、粒

表3 Hot Gas Cleaning Symposium
における発表論文の変化

分 野	第1回 1986年	第2回 1994年	第3回 1996年
サイクロン	7	4	2
電気集塵	5	2	2
濾過集塵	7	16	15
セラミック	1	2	4
金属	3	4	2
粒子充填層	3	—	—
その他	—	—	—
ガス除去	—	5	14
脱硫	—	4	3
酸性ガス	2	3	2
アルカリ	—	—	—
その他	—	—	7
計	3	—	7
その他	—	2	8
計	31	42	66

子とガス、あるいはアルカリや硫黄と重金属などの同時除去法の開発や高温での微量ガス成分の測定法などに関する研究が盛んに行われている。また粒子除去に関してはセラミックフィルタについて最も活発に研究が行われているが、硬質フィルタだけでなく、大きな容積当り濾過面積が得られるクロスフローやハニカムや、低圧損の軽量の圧縮繊維成型体フィルタなど幅広い素材、方法が模索されるとともに、粉塵粒子の高温物性、堆積構造など基礎的な研究が重要となっている。

おわりに

高温集塵は発電技術開発以外では放射性廃棄物の焼却処理時、ディーゼル排ガス処理などでも使用されており、このためにセラミックフィルタあるいは高温HEPAフィルタなどの製品開発、研究があるが、現在の高温集塵の中心はやはり、セラミック焼結体フィルタである。しかし、フィルタ取付部でのシールが十分に出来ないことに起因するダストリーク、フィルタの割れ、逆洗方法、スケールアップなど実用化に向け解決しなければならない多くの問題点が残されている。

国際出願は増加傾向

特許協力条約（PCT）に基づき世界知的所有権機関（WIPO）を経由した特許の国際出願が97年に5万4,422件になり、前年を15.1%上回った。国別には米国が出願全体の41.8%を占め、次いでドイツ（13.7%）、日本（8.9%）の順。PCTは現在、94カ国が締約国となっており、締約国数増加や手数料引き下げで利便性が増していることか

ら、今後も出願増加が続きそうだ。

PCTに基づく特許出願は低コストで一度に多数の国に出願できるのが利点。出願増加に対応、今年1月1日に手数料が引き下げられた。97年以降、新たにガーナ、ジンバブエ、シエラレオネ、インドネシアなど8カ国が締約国となり、出願先も広がっている。（日経 10.2.11より）

増える欧州特許出願

欧州特許庁（ミュンヘン）への特許出願が増えている。同庁によると、97年の出願受理は99,800件と前年に比べ14%増加した。出願の半数は、欧州特許庁に加盟する19カ国からのものだった。

出願が最も多かったのは米国で、全体の28%を占め、件数も前年比1,800件増えた。

2位争いを演じているドイツ（19%）と日本

（18%）からの出願はともに1,500件の増加を記録した。

分野別では医療関係が最も多くて6,223件、これに電気通信の5,062件、電気部品の4,841件が続く。伸び率が高かったのは情報処理の28%（総件数は3,037件）、生化学／遺伝子技術の22%（同2,217件）など。（日刊工 10.6.23より）

第4回 ホソカワ粉体工学シンポジウム報告

第4回 ホソカワ粉体工学シンポジウムが平成10年1月14日(水)(午後1時00分～午後5時00分)東京・中央大学駿河台記念館において粉体技術談話会主催、ホソカワミクロン(株)後援のもと開催され、テーマ「微粉体の付着力、粒子界面特性とその制御」について活発な講演と討論がなされた。その概要と討論について誌上再録してみたい。

●プログラム

- 13:00～13:05 開会挨拶 粉体技術談話会会長
名古屋大学名誉教授 神保元二
- 第1部 テーマ講演(講演 30分、質疑・討論 15分)
- 13:05～13:45 「粒子間の液架橋形成機構とその付着力」
大阪府立大学 教授 向阪保雄
- 13:45～14:25 「静電気と粒子付着力」
創価大学 教授 山本英夫
- 14:25～15:05 「粉体表面の物理化学的特性と改質制御」
東京都立大学 教授 近沢正敏
- 15:05～15:15 休憩
- 第2部 関連トピックスならびに討論(話題提供 15分)
- 15:15～15:30 「気流による粒子再飛散および遠心分離に基づく粒子-壁間付着力の解析」
京都大学 講師 松坂修二
- 15:30～15:45 「新エネルギーシステムと粉体の高温物性」
東京農工大学 助教授 神谷秀博
- 15:45～16:00 「二酸化ケイ素(カープレックス)添加による粉体食品の流動性改良」
塩野義製薬株式会社 井上速男
- 16:00～16:15 「機械的粒子表面融合による粉体の流動性と粒子付着力の変化」
ホソカワミクロン株式会社 横山豊和
- 16:15～16:55 総合討論 司会:中部パウテックプラザ研究所 所長
名古屋大学名誉教授 神保元二
- 16:55～17:00 閉会挨拶

(編集部)

●講演概要

第一部：テーマ講演

(講演) 粒子間の液架橋形成機構とその付着力

大阪府立大学 教授 向阪 保雄

＜内容＞ 2つの球形粒子間に形成される液架橋を対象にして、どのようにして液架橋が形成されるのか、液架橋付着力に及ぼす諸因子は何なのか、またその制御はどのようにすればよいのかなどについて、さらに、この考え方に基づいた粉体の平衡含水率および粉体層の付着強度について先生らが行ってこられた研究を中心に概説。

(講演) 静電気と粒子付着力

創価大学 教授 山本 英夫

＜内容＞ 少なくとも粉体工学の教科書レベルでは、乾式での粒子付着力は、液架橋力＞ファンデルワールス力＞静電気力の順に小さくなり、静電気力は無視できる場合が多いことになっているが、このことは、例えば電子写真プロセスが健全に機能することを始めとする幾つかの日常経験とは、整合性が悪いのではないかと印象を受けることも少なくない。講演では、粒子に働く静電気力について概観され、こうした問題に関連して、先生が最近検討を進められている幾つかのトピックスについて紹介がなされた。

(講演) 粉体表面の物理化学的特性と改質制御

東京都立大学 教授 近沢 正敏

＜内容＞ 粒子付着力は粒子表面特性と密接に関係していることから、その表面の改質によって付着力の制御、ひいては粉体物性の制御が可能となる。講演では、試料として非晶質シリカ粉体を用い、表面のキャラクタリゼーション、さらに表面改質による濡れ性制御、付着力制御のマイクロ機構の概要について述べられた。

第二部：関連トピックスならびに討論

(話題) 気流による粒子再飛散および遠心分離に基づく粒子一壁間付着力の解析

京都大学 助教授 松坂 修二

＜内容＞ 気流による粒子再飛散と遠心分離法を利用した粒子の分離機構の解析、および流体力学的手法をさらに発展させて、流体抵抗から粒子の

付着力を求める方法について講演。

(話題) 新エネルギーシステムと粉体の高温物性

東京農工大学 助教授 神谷 秀博

＜内容＞ 高温高压特殊雰囲気での粉体の諸現象が問題となっている例として、石炭、廃棄物等の高効率クリーン発電システムを中心に紹介。さらに、これらシステムで新たに解明が必要となっている粉体の高温物性に影響を与えている温度雰囲気による粉体表面の化学組成、分子構造等の解明について、いくつかの知見を紹介。

(話題) 二酸化ケイ素（カープレックス）添加による粉体食品の流動性の改良

塩野義製薬株式会社 井上 速男

＜内容＞ 平成3年1月「微粒二酸化ケイ素」としてシリカが食品添加物への使用を認められたことをきっかけに、この規格に適合し、粉体食品の流動性改良、固結防止などに有効な粉体物性を有する微粒二酸化ケイ素の製造販売を行なっているとのことで、各種粉体食品に添加した場合の流動性改良効果およびそのメカニズムについて講演。

(話題) 機械的粒子表面融合による粉体の流動性と粒子付着力の変化

ホソカワミクロン(株) 粉体工学研究所

横山 豊和

＜内容＞ 粒子の機械的表面融合により粉体物性を大きく変えられることが知られているが、本講演では、PMMA粒子へのTiO₂の表面融合による粉体の流動性に関係した物性の変化を測定すると共に、原子間力顕微鏡(AFM)を用いて単一粒子の付着力を測定し、両者の関係について実験的に検討した結果が報告された。

●総合討論記録

神保(司会)：総合討論をお願いいたします。一番始めにもお話いたしましたように、自由な意見交換・討論というのが一番主な目的ですのでひとつよろしく願います。

本日のご発表はいずれも大変興味深いもので、第一部は、大家と申し上げていいかどうか知れま

せんが、先生方の絶的なお話をうかがったわけ
です。第二部は、若手と申し上げていいのかわ
かりませんが、相対的に若い方々に、かなり
具体的な問題についてお話をうかがいました。
特に、最後の二つは企業の側からご発表いた
だきました。それぞれの企業で粒子の改質に取
り組んでおられますところから、一体これがど
ういう訳でこうなっているのだという問題提
起がありましたが、それにある程度お答えで
きればと思います。そういうことで、特に総
括をすることもございませんが、全体として
言えることは、やはり第一部のある程度エ
スタブリッシュしたご研究という大変ですが、
付着力に関して、理論とのつながりや基本
的な現象について研究を進める場合、どう
してもスタティックで、一個粒子が対象のご
研究になります。わたしが興味深いと思っ
たのは第二部のお話は、ほとんどが粉体群
といいますが、粉体集合体、あるいは動的な
現象ということが言えるかと思ひます。こ
れはもう、30~40年前、わたくしどもが
研究を始めた頃から問題となっておりまし
た。一個粒子のスタティックな現象と多数粒
子でダイナミックな現象をどうつなぐかとい
う問題、これはずっと大きな問題として続
いてきたと思ひます。松坂先生のお話など
はその間をつなぐという一つの試みでいら
っしゃるかと思ひます。そういうことを念
頭におきながらご討議をお願いします。そ
れで、特に後半の第二部の方は大変時間
が短かったものですから、充分なご質問が
出来なかったものがあるかと思ひます。そ
こで、まずそれに対してご質問もしくは
コメントをお受けしたいと思ひます。ど
なたか。

砂田(名城大)：塩野義製薬の井上さん
のお話で、最後のところで、対象とする粉
体に微粒子(カープレックス)を添加する
ことで流動性が向上するのは、微粒子が
ころの役目をしているというお話だった
と記憶していますが、微粒子が表面につ
いて曲率半径が変わり、粒子間のトータ
ルの距離が大きくなったために付着力が
減少したのではないかと思ひるんですが、
いかがでしょうか。

神保(司会)：カープレックスの粒径は
どれくらいですか。

井上(塩野義製薬)：一個粒子はだいた
い20~30ナノメートルです。それが、
かたまつて凝集体と

なっています。

神保(司会)：母粒子の上にはわりあい
と分散して付着しているわけですか。

井上(塩野義製薬)：はい、そうですね。

神保(司会)：そうすると相当付着力が
大きいから、そんな簡単には動かないの
じゃないですか。ころころ転がったりし
ないのではないですか。

井上(塩野義製薬)：おっしゃるとお
りですね。実は実際に転がっているところ
を見たことが無いのです。(笑)

砂田(名城大)：やはりそれは、曲率半
径が変わるかなんかして、粒子同士の平
均的な距離が離れるとかということで付
着力が減少しているように思ひるんです
が。

神保(司会)：そうするとどうして、横
山さんがお話になった、ただ混合したも
のよりメカノフュージョンのような処理
をしたもののほうが安息角が小さくなる
のでしょうか。逆に今度はそれがどうして
だということになりませんか。

砂田(名城大)：メカノフュージョン
処理をすれば、おそらく、加えた微粉同
士の付着というのがなくなるのではと思
ひます。微粉だけだとかなり安息角があ
りますからね。

神保(司会)：ある程度、微粉、凝集
粒子みたいなものがあると……。

砂田(名城大)：そうそう。ところが
固定しますとその影響が無くなつてく
るという風に感じています。

井上(塩野義製薬)：私も先生のお
っしゃる通りではないかなと思ひます。

山口(新潟鉄工)：新しいこと知ら
なくて、昔のことを思い出して質問さ
せていただきます。神谷先生のご発表
についてですが、フライアッシュとい
うのは当然、燃焼条件によって違うわけ
ですね。燃焼条件が違うというのは、
鉄分の酸化の状態、つまり鉄が2価
であるか、3価であるかという状態と
溶融点とは非常に関係があるということ
をちょっとやったことがあるのですけ
れども、高温での付着力とそういった
成分との関係というのは……。

神谷(東京農工大)：成分分析までは
やっておりませんが、酸化の状態が高
温付着力に影響を及ぼすことは間違
いないと思ひます。

神保(司会)：燃焼条件もそうですけれど、フライアッシュというのは、わたくし昔、重金属の問題のときに、むしろ冷却プロセスが大事で、重金属がわずかでもデポジットしていると、今日の向阪先生のお話じゃないけれども、イオンがちょっと変わればものすごく変わるとか、冷却プロセスまで考えないといけないかと思うのですが、

神谷(東京農工大)：ちょっとそういう意味では、ここで使ったフライアッシュはですね、実はJISの10種を使っております……

神保(司会)：そりゃだめだ。(笑) 他のご質問はありますでしょうか。はい、荒川先生どうぞ。

荒川：あまり、本質的なところではないんですけども、ここの写真にでていくらいの大きいフライアッシュですと、粒子は非常に薄い殻の中空です。そのため、当然のことながら沈降法で粒度測定をやることは困難になります。

それから、近沢先生ちょっと教えていただきたいんですけども、窒素の低温吸着で測った多孔体のポアとそこに水分が入る話とは同列に議論できるのででしょうか。水の分子が入る入り方と、窒素分子が入る入り方は同じなのでしょう。

近沢(都立大)：今は細孔を40オングストロームでやっておりますが、どんどん広くして行きますと、違ってきます。直径にたいして球形のある程度大きさがありますから、大きさによってつまり方や隙間のできかたなんかが違うので壁の効果が出てきます。ご指摘のとおりです。

荒川：ついでにもう一ついいですか。横山さんに。

神保(司会)：一通り全員いじめて下さい。(笑)

荒川：以前に複合粒子の断面をきって、粒子層がどれくらいついているかということをやっておられたと思いますが、添加物である酸化チタンの添加割合をどんどん増やして行くと表面の粒子層の厚さはどんどん変わって行くのでしょうか。いくら入れても全部、粒子の表面につくのでしょうか。

横山(ホソカワミクロン)：それは必ずしもそうではないと思います。

荒川：どこかに限界があるのでしょうか。小さい粒子が大きい粒子の表面に何層ぐらいまで理想

的に付けられるのか。たとえば、酸化チタンの1層目と2層目、その間の付着力というのは、酸化チタン同士の付着力と考えられると思います。吸着と同じで、多粒子層の形成というのはどこかで難しくなると思います。そういう風な粒子の厚さとの関係というのは何かお調べになっておられるでしょうか。

横山(ホソカワミクロン)：わたくし自身は直接そこまではやっていないのですが、以前、内藤さんらによって、ガラスビーズに酸化チタンをつける場合の処理条件が付きやすさに及ぼす影響について検討がなされています。

内藤(ファインセラミックセンター)：私が今実験をしておりますのは、粒子を少しずつ添加して行ったときに、どのように付着の状態が変わるかということをやっております。そうしますと、荒川先生がおっしゃったように、下地の上に第一層をつけるときと、つけた第一層の上にもう一層つけるときとでは明らかに付着効果が違うわけです。それともう一つは、つけていくときにどれくらいの量を添加していけばいいのかということです。少しずつつけていくときの添加速度によってもつき易さは影響を受けます。

神保(司会)：横山さんのご発表で、核粒子の表面に非常にきれいにモノレイヤーで子粒子がびっしり詰まったような写真がありましたが、核粒子にも凹凸が多少あるでしょうし、それに比べると複合粒子のほうがかえて平滑であるとも考えられると思いますが、そのあたりはいかがですか。

横山(ホソカワミクロン)：今回の場合、核粒子のほうは表面は平滑で、処理後の方が幾分表面が凸凹しているように思いますが、他の系については調べておりませんのでちょっと比較はできません。ただ、ファンデルワールス力以外の効果も複雑に影響してくると思いますので、表面の凹凸だけで付着力が一義的に決まるとは考えておりません。

桑原(名工研)：今の横山さんのお話に関連して、メカノフュージョン処理により圧縮度が改善されたのは、やはり接点の問題が効いていると思います。複合粒子になって、実際は大きな粒子だけれども、その接点では小さい粒子の付着と考

えられるのでは。

神保(司会)：結局、微粉があれば、微粉の曲率半径でファンデルワールス力を計算すればいいということですね。でもそれがほんとですかね。ファンデルワールス力をみなさん計算されていますが、あんなに合うのはすごいと思うんです。昔はぜんぜん合わないと思っていたのですが、松坂さんにお聞きしたいのですが、粒子付着力によって変形するという計算を皆さんさいますが、粒子の表面を見ると平滑なように見えても相当でこぼこしています。逆遠心なんかかけるとグロット転がって安定した接触点での面積のほうが効いて、付着力変形なんかで計算するよりもかなり実際は大きくなっているように思いますが。

松坂(京大)：今回はHertzの理論を使って、付着力変形だけでどれくらい弾性変形するかについて計算したのですが、20~100マイクロメートルぐらいの粒子ですと、イメージとして直径0.1ミクロンぐらいの接触面積になります。そこで今回は、AFMを使って0.2ミクロン角の範囲の表面粗さでチェックしましたが、1ナノメートルとかのオーダーになります。今回は、同一の粒子群で2百数十から400ぐらいの範囲で測定して、ちょうど中位値のところを代表としましたが、それよりも分布として高いところにあるものが、2点接触、3点接触になって表面粗さが効いているものと思います。特に、表面粗さがナノ以下の場合、粒子間距離の4オングストロームというところが変わると思います。

神保(司会)：横山さんの計算のあれだけけれども、粒子間距離が4オングストロームですか、これが、スタンダードになっているようですが、どうもそこがちょっとおかしいように思うのですが。

松坂(京大)：一般的に、計算は4オングストロームでやられていますが、実際にAFMで測定しますと10オングストロームぐらいの表面粗さが出てくるわけです。このような微少表面粗さの場合には、粒子間距離の中に入れるほうが良いと思います。粒子間距離は二乗で効いてきますから。

神保(司会)：私もちょっとそのへんが……。それではですね、時間も迫ってきましたのでいかがでしょうか。特に添加剤の添加あるいはメカノ

フュージョン処理による物性変化について、多少はお答えをしなければいけないような気がするんですが……。カープレックスを添加した場合と、メカノフュージョンなどの処理をした場合で表面特性がいろいろと変わると思いますが、向阪先生そのあたりでご意見ございますか。

向阪(大阪府大)：表面粗さの話ですが、それは理論が確立されておりまして、表面粗さが大きい場合、ファンデルワールス力は、曲率半径とともに体積効果も効いてきます。つまり、隙間の部分についてはファンデルワールス力は働きません。カープレックスの場合もそうだけれど、横山さんの場合も、粗さと体積効果の両方が効いてファンデルワールス力が小さくなるという話でいけると思います。

神保(司会)：ファンデルワールス力で話がつかってしまうということですね。そしたら、単にミキシングしたものよりメカノフュージョン処理したもののほうが付着力が下がるのはどのように考えればいいですか。

向阪(大阪府大)：たぶんそれは、ミキシングしたものでは、ばらばらに表面についてないと思いますが、メカノフュージョンでは表面に均一についているからだと思います。小さい粒子が介在しているということで小さい粒子同士のファンデルワールス力ということになります。ファンデルワールス力は粒径の減少とともに小さくなりますから。

神保(司会)：ありがとうございました。近沢先生はいまのメカノフュージョンの話をどのように考えられますか。表面特性にも何らかの変化を起こしてということが関係あるかどうか。

近沢(都立大)：こういった小さいところでは曲率とか、表面の凹凸のほうが大きく効いてくると思います。わたくし非常に面白いと思ったのはファンデルワールス力が2、3分の1以下になったとか。私もAFMで付着力を測定しますと、フラットなシリコンを酸化したものと、粒子同士の場合を比べますと、フラットのほうが大きく出てきます。やはり同じ状態の場合には化学的組成とかが効いてくると思うんですが、神保先生が昔やられたガラス同士を擦りあわせると付着力が10分の1以下になるというのを記憶しているのですが、

そういう具合に幾何学因子が非常に大きいと思います。同じ状態のときに、数割とかそういった違いが出てくるのは、表面の組成の方だと思うんですが、毛管凝縮するとかしないとかという場合には、もっと大きな効果が出でくるかと思います。

神保(司会)：ありがとうございます。

砂田(名城大)：いまの話の続きなんですが、以前に大塚先生のやられた結果では、子粒子が大きな粒子の10分の1以下の微粉であれば、付着性が大きければ大きいほど、流動性の効果が大きいという論文があったかと思います。小さい粒子と大きい粒子の間に付着力が働かなければ表面にひつつかずにどこかにいってしまうかと思いますが。

神保(司会)：カープレックスなどの場合にはどうもそれだけで説明がつくとも思えないんですが、帯電のほうとは何か関係がありますか。山本先生いかがですか。

山本(創価大)：ないと考えます。同じ種類のものどうして異符号には帯電しにくいだろうと思います。静電気力というのは異符号の間での付着力であって、母粒子にカープレックスがくっつくという現象は、たぶん静電気力も働いていると思いますが、くっ付いた後の粒子同士が静電気にくっつくとは原理的には考えられません。ただ、複合した粒子の表面がまだらで、複合された部分と複合されていない部分があった場合に、そのエリアが異符号に帯電する場合はあると思います。あれだけきれいに子粒子がまぶされていると、異符号には帯電しないと思います。

神保(司会)：カープレックスだけとは言いませんが、最近いろんな流動性が改善されるなんてのがありますが、普通のシリカゲルを入れたときとはちょっと違う何かもっと物質的なとかケミカルというものがありそうな気がします。いかがですか何かそのあたりは、井上さんのほうでご意見はございませんか。

井上(塩野義製薬)：先ほどの山本先生のお話にありましたが、カープレックスを引っ付けようと思ってもなかなか引っ付かない場合があると思います。母粒子同士のほうがなじみやすいというか、粒子同士の間に割って入ろうとしても入れないとか。

神保(司会)：だからそういう問題であるとし

ますとファンデルワールス力ではなくて、もう少し帯電とか水分とかの関係だとかが入ってこないファンデルワールス力だけで説明がつくのかなということになりませんか。それでもやっぱりファンデルワールス力だけでしょうか。向阪先生いかがでしょうか。

向阪(大阪府大)：それはHamaker定数に差があるからではないかと思います。粒子と粒子があって、その間に介在するものが水であるか空気であるか、水が吸着するとHamaker定数が変わってきます。もちろん静電気力も若干はあると思いますが。

山口(新潟鉄工)：ものによってもかなり性質が異なるのではないですか。

神保(司会)：まだまだ議論は続きそうですがそろそろお時間かと思えます。今日はいろいろと問題点を出していただきました。皆様方にはその結果を持ち帰って、ご研究していただきたいと存じます。私の希望を少し申し上げますと、せん断試験というのをやりますと、もう少し表面の凹凸だとか、付着粒子の脱着の問題とかいうのが出てくるのではないかと考えておりまして、ただ、昔せん断試験をだいぶやりましたけれど、ちゃんと発表するほど自信のあるデータまできちんと出てこなかったもので、頭の良い方ははじめからやらないのかもしれませんが、そこは一つもう少しつめることがあるのではないかと思います。私のところのことばかり言ってなんですが、神谷先生はかなり動的なところまでいったんですけど、ああいうのはくだらんと思ったのか、最近はそのようなのはやっていないようだし(笑)、内藤さんもかなり動的なことをやったのですが、椿先生にはお話を伺えなかったけれど、たとえば時間依存性とかの特性なんか、松坂先生の研究などにはもう少し突っ込みたかったんですけども、やはり先ほど申し上げましたようにスティックで一個粒子のものと現実の問題との間にはまだまだいろいろやることがあるかもしれませんが、先生方また会社の方々の一層のご努力をお願いしたいと思っています。今日はたいへんご協力ありがとうございました。

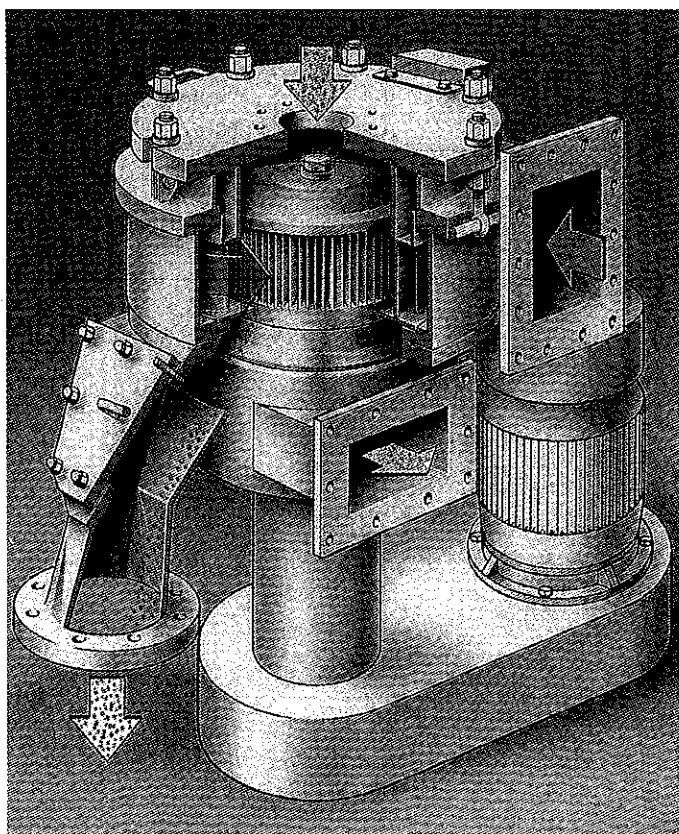
(文責 永徳 久登)

ホソカワアルピネ

TSPセパレータ

—超微粉カット抜群のトナー専用分級機—

研究開発部*



超微粉除去の要望は年々高まっています。

トナーや粉体塗料など微粉末で粒度分布の非常に狭い製品を製造する場合、その原料性状により製品に一定量の超微粉が混入することは避けられません。

近年、分級機内蔵型粉碎機の普及により、粗大粉の混入がない微粒体の製造は可能となりましたが、こういった粉碎機でも単独では超微粉域をカットして、ごく狭い粒度分布内に製品粒度をまとめることは難しいのが現状です。

TSPセパレータはこのような製品への超微粉の混入を最小限に抑えることを目的にホソカワアルピネ社で開発されました。

1. 性能

このTSPセパレーターの性能は図1に示しますように従来の分級機では成し得なかった超微粉除去が可能です。粒度分布の狭いトナーや粉体塗料を製造することが可能となりました。

トナー以外でも製品中の超微粉の除去により、最終製品の品質が飛躍的に向上するようなアプリケーションに適用できます。

*ホソカワミクロン株式会社
(〒573-1132 大阪府枚方市招提田近1-9)
Tel. (0720) 55-2231

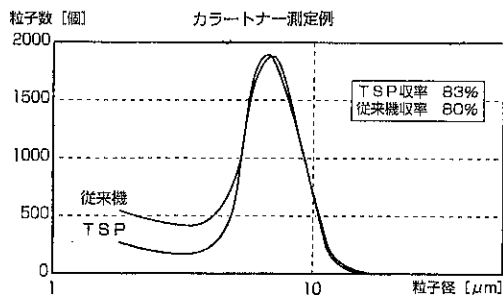


図1 従来機との製品粒度分布比較

2. 特 徴

本機は随所に優れた新設計機構を装備し、特に付着性の強い粉体、弱熱性トナーに最適であります。

●優れた超微粉除去性能

製品中に超微粉が混入することを嫌う粉体に最適です。

●非常に高い分級効率

カウンターフロー分級で高い分級精度による高収率と大きな処理能力がえられます。

●コンパクトな設計

部品をモジュール化しているため、主要部分は上部から分解・組み立てができます。

●動力費の削減

空気力学に基づく設計で圧力損失が小さく、エネルギー効率が高いためランニングコストが安くなります。又、運転が安定しており製品品質が一定しています。

●分解・清掃容易

機内の付着、堆積が少なく洗浄の邪魔となる死角がありません。

本機の標準仕様を次の表1に示します。

表1 ホソカワアルピネ TSPセパレータの標準仕様

型 式	スケールアップ ファクタ	処理能力 ^{注)}	動 力
200TSP	0.4	60kg/h	3kW
250TSP	0.6	90kg/h	4kW
315TSP	1.0	140kg/h	7.5kW
400TSP	1.6	230kg/h	11kW
500TSP	2.5	360kg/h	18.5kW

注) トナー

特許一言メモ No.167

経済状況の深刻化影響か！知的財産権出願の減少（韓国）

今年に入って特許を始めとした知的財産権の出願が著しく減少していることがわかった。

特許庁が集計した今年1月から3月までの出願現況によると、この期間中、総3万7千余件を出

願し前年同期対比約23%減少したものと集計された。特にこのような減少現象は、内国人による出願（約27%減少）において目立った。

ホソカワミクロンアグロマスタ AGM-SD

—液体原料の直接顆粒化装置—

—噴霧乾燥式流動層造粒装置—

研究開発部・技術開発グループ*
辻本 広行

1. 液体原料の顆粒化プロセス

液状食品，化学合成溶液，ならびに各種のスラリー液などの液体原料を乾燥して粉末を得るプロセスでは噴霧乾燥装置が多用されている。この装置では通常，製品捕集用にサイクロンやバグフィルタが用いられる。ここで得られた微細な噴霧乾燥粒子については，流動性，充填性，再溶解性，ならびに成形性等の改善を目的として，顆粒製品にすることが多くなり，最近ではこの目的で噴霧乾燥装置内に流動層造粒部を設け，これに仕上げ乾燥装置を接続する装置が開発されている。また，最終製品として美観のある球形状顆粒を製造する場合は，押し造粒機を用いて円柱状造粒物を調製し，これを転動式球形化と乾燥を行って球形状顆粒にするのが一般的である。

以上のように液体原料からの顆粒製造プロセスは，多くの単一機能機器が用いることによる製造設備の長大化と共に，設備投資，ランニング，メンテナンスなどの諸コストの負担が大きく，それらの短小化と省力化が可能な新しい乾燥・造粒技術が求められている。

弊社では，これらのニーズに対して，1台の装置内で液体原料を直接顆粒にする噴霧乾燥式流動層造粒装置「アグロマスタ」AGM-SDタイプ

(98年特許出願中)」を新たに開発した。本装置は各種の液体原料から連続的に直接球形状顆粒を製造するユニークな流動層応用造粒装置であり，以下にその概要を記す。

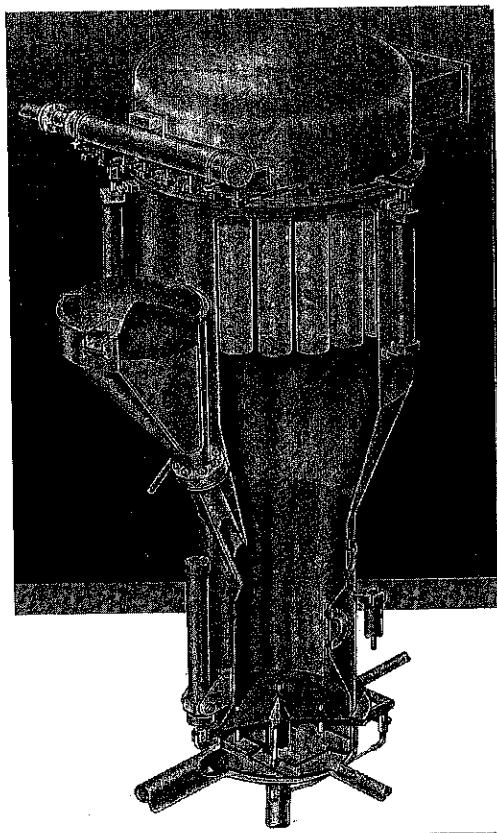


図1 噴霧乾燥式流動層造粒装置の本体構造

*ホソカワミクロン株式会社
(〒573-1132 大阪府枚方市招提田近1-9)
Tel. (0720)55-2231

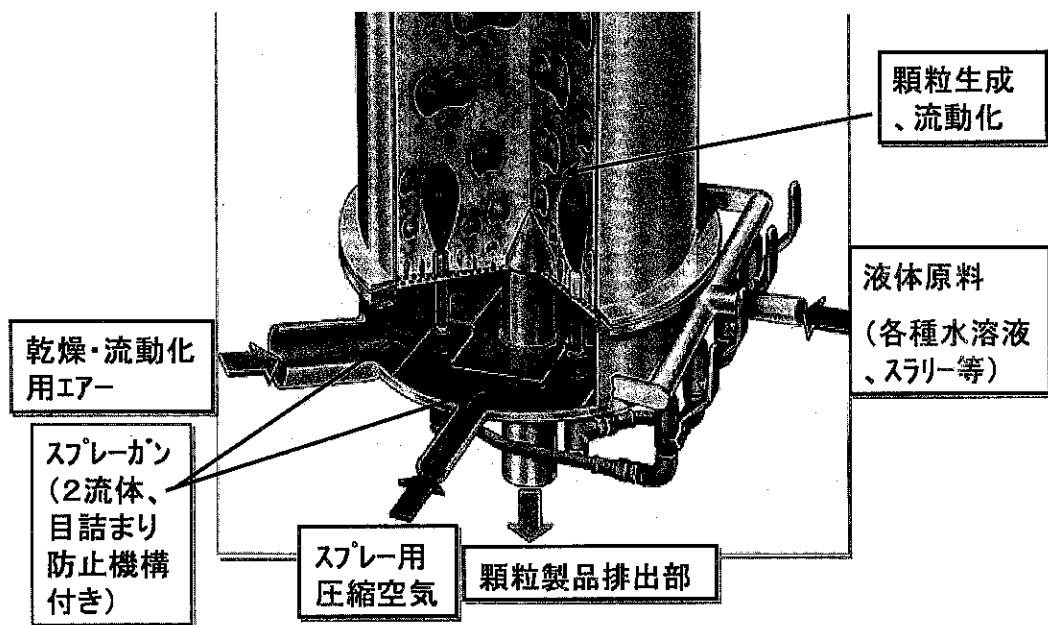
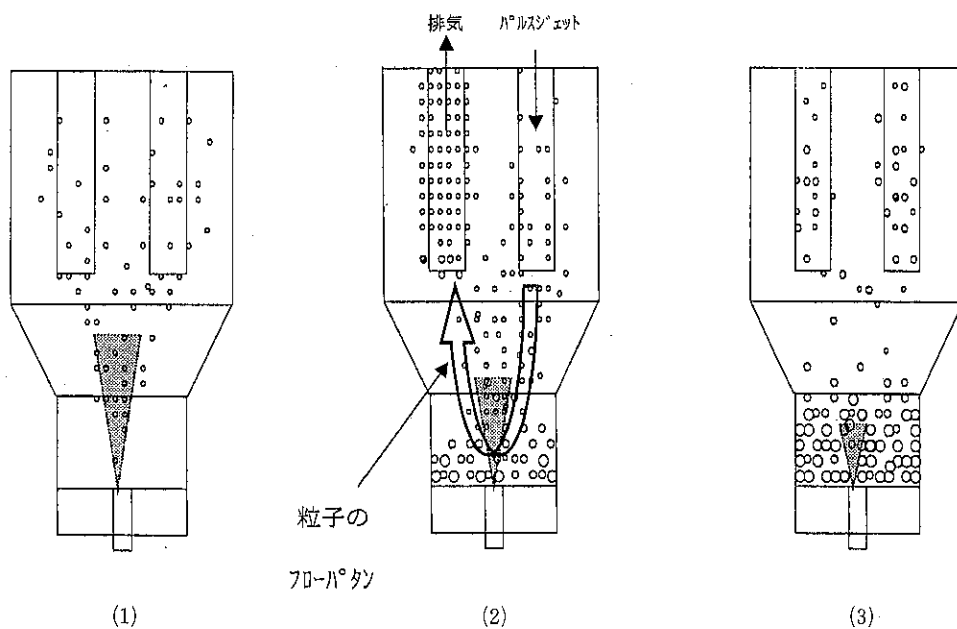


図2 噴霧乾燥式流動層造粒装置の造粒部の構造



- (1) 微粒子（核粒子）の生成領域
- (2) 微粒子の生成とその凝集及び微粒子へのレイヤーリング造粒領域
- (3) レイヤーリング造粒領域

図3 噴霧乾燥式流動層造粒装置における液体原料の顆粒化プロセス

2. 噴霧乾燥式流動層造粒装置

図1は本造粒装置の外観写真である。本装置システムは機械的可動部のない流動層造粒装置と同様に熱風供給部、造粒用チャンバ部、中間チャンバ部、ならびにバグフィルタ部より構成される。液体原料供給用の2流体スプレーノズルは図2に示すように通気板部に上方に向かって取付けられた、いわゆるボトムスプレー方式を採用している。運転操作は基本的には流動層内へ高温空気流を供給し、このボトムスプレーから液体原料を高温空気流と並流で噴霧供給するだけの極めてシンプルな方法である。

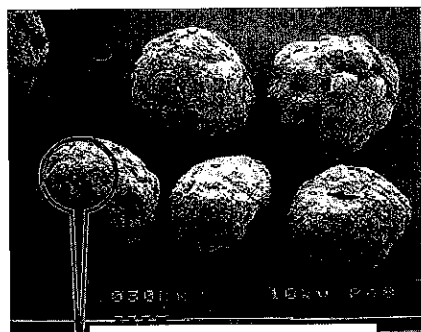
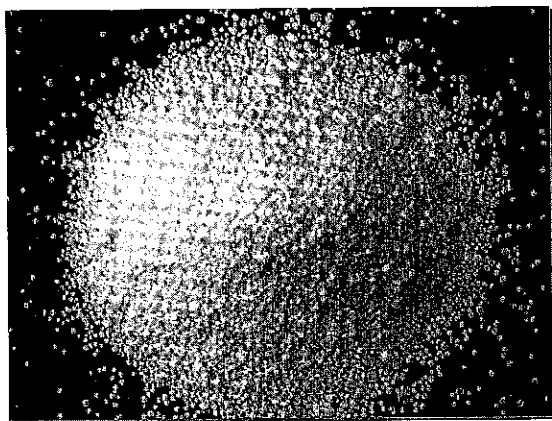
3. 顆粒の成長メカニズム

図3は本装置による顆粒の成長機構を模式的に示したものである。高温空気流の流入する空塔内にスプレーノズルより噴霧供給された液体原料は、その上昇過程で微粒化して瞬時に乾燥され、微細粒子（粒子径：数 μm ～数十 μm ）となって上部

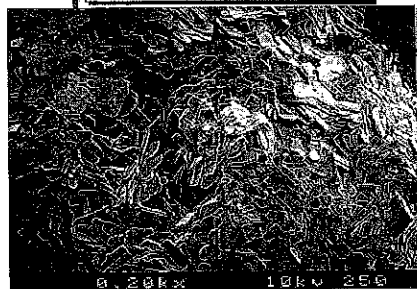
のフィルタバッグに捕捉される（図中の(1)）。このフィルタバッグ部ではその内部への定期的な圧縮空気の吹込み（パルスジェット方式）によって粒子の払い落としがなされる。微細な粒子群はその慣性力によって下部のスプレーゾーンに落下し、ここで核粒子となって液体原料にレイヤリングされる。この核粒子はレイヤリングされた溶出固形分のみの粒子成長を経て上部のフィルタバッグ部に再度捕捉される。すなわち液体原料は噴霧乾燥造粒法による微細な核粒子の生成と共に、一旦生成された核粒子へのレイヤリング造粒に消費される。これらの現象の継続によって粒子は成長を続け、やがてその粒子径が高温空気流の上昇速度に対して相対的に終末速度以下に成長すると、粒子は装置下部で流動層を形成するようになる（図中の(2)～(3)）。

以上のような噴霧乾燥原理と流動層レイヤリング原理が複合された新しい造粒機構に基づいて成長する粒子は、図4に示すように粒度分布はシャープで、かつ極めて高い球形度を持った顆粒

顆粒品の一例
原料：食品添加剤の水溶液
(平均粒子径 $900\mu\text{m}$)



顆粒品の電顕写真



顆粒品の表面拡大 微粒子のレイヤリング造粒が行われている

図4 球形顆粒製品の一部

製品が得られる。

この製品顆粒の排出は、バッチ運転の場合には通気板中央部の排出口より一括して行われる。他方、連続運転では流動層が所定の顆粒のホールド量に到達した時点（例えば図3中の(3)）から、固形分供給速度に等しい量を排出口よりシール付き排出機（ロータリバルブ等）を介して連続・定量的に抜き出される。さらに製品の粒度の選別を行う場合には閉回路フローが構築される。運転条件や原料の吸湿性の大小にもよるが、連続運転の場合でもレイヤリング造粒機構（粒子表面付着液のみ水分が大、核粒子は乾燥）のため、一般に積極的な仕上げ乾燥を必要としない場合が多い。

4. 本装置の特徴

本装置はそのユニークな造粒原理により、従来の噴霧乾燥方式に比較して以下に記す特徴がある。

- ・噴霧乾燥方式では困難であったバッチ運転による多品種運転が容易に行える。
- ・連続運転による大量処理としては、原料処理能力で1500kg/hr at（水溶液中の固形分濃度50% w.b., 入口空気温度130℃, 排気温度50℃ 基準）までのスケールアップが行える。
- ・製品捕集部としてのバグフィルタを内蔵し、かつ造粒装置や仕上乾燥装置を必要としないので、

従来の製造プロセスが大幅に短縮化され設備スペースが縮小でき、これに伴い設備コスト、ランニングコストが大幅に削減できる。

- ・噴霧乾燥法ではできない大きな球形状顆粒（平均粒子径で30～3000 μ m程度の範囲で制御可能）が作製できる。
- ・流動層装置を使用するため、噴霧乾燥装置に比べ製品水分（排気湿度）を高く維持できるので高い熱効率での運転が可能となる。また噴霧乾燥と共にレイヤリング造粒がなされるので、従来の製造プロセスで顆粒化のために行っていた再液添加操作や後乾燥操作が要らず効率的である。
- ・液体原料を極力微粒化（平均液滴径で8～15 μ m程度）させることで装置内での固・気接触を飛躍的に向上させ、高い熱効率を実現しており、これにより従来の噴霧乾燥装置等に比較して装置の大幅な小型化に成功している。

5. おわりに

本装置による洗剤用原料、食品添加剤、液状食品、香味原料、化学合成液等の各種水溶性原料の球形状顆粒化製造装置としての納入実績ができており、今後、省エネルギープロセスを実現する流動層応用装置として、広く採用されていく新しい造粒、乾燥技術であると考えている。

特許一言メモ No.168

技術的範囲に新判定制度導入

特許庁は、7月1日から特許発明や実用新案などの技術的範囲について、新判定制度を始める。

対象製品が特許発明の範囲に属するかどうかについて、明細書の特許請求の範囲の記載があるかどうかを原則とする。また判定書を入手するまで

の期間について、従来の12カ月から22カ月かかっていたのに対し、最短で3カ月、最長で6カ月に大幅短縮する。新制度の導入により、知的財産権を巡る侵害訴訟事件など特許裁判の早期解決が図れる。（日刊工 10.6.25より）

ホソカワミクロン ダイナックス焼却システム

研究開発部・技術開発グループ*

1. はじめに

日本のダイオキシン類の発生源として、ごみ焼却施設が約80%、産業廃棄物が約10%、金属精錬施設が約5%と環境庁から報告されており、その対策が急務とされています (Table.1)。日本では埋め立て場所が少ないため、減容化する手段として焼却処理せざるを得ない状況にあり、焼却炉数は諸外国に比較してきわめて多く設置されています。そのため、各都道府県では、大・中型焼却炉に対してのみならず、住宅近隣に設置されること

の多い小型焼却炉に対しても基準を定めています。例えば、東京都では、火格子面積（物を燃やす面積）が0.5㎡以上または同等の能力を持つ焼却炉はすべて規制の対象になります。したがって、小型焼却炉に対しても厚生省の構造・維持管理基準 (Fig.1) を満足できるような設備である必要があります。弊社のダイナックス焼却システム（中・小型焼却炉）のすべてのラインアップはこの構造・維持管理基準を満たしており、また、ダイオキシン類、塩化水素及びばいじんによる大気汚染の防止を十分に図れる設備です (Fig.3)。

Table.1 廃棄物処理法に基づく厚生省令（規制値）

指定物質排出施設	（炉仕様）	指定物質抑制基準
製鋼の用に供する電気炉（鋳鋼又は鍛鋼の製造の用に供するものを除く。）であって、変圧器の定格容量が1,000kVA以上のもの		新 設：0.5ng-TEQ/㎡N 既 設： 5ng-TEQ/㎡N
廃棄物焼却炉であって、火格子面積が2㎡以上、又は焼却能力が1時間当たり200kg以上のもの	焼却能力：毎時2,000kg未満	新 設： 5ng-TEQ/㎡N 既 設： 10ng-TEQ/㎡N
	焼却能力：毎時2,000kg以上 4,000kg未満	新 設： 1ng-TEQ/㎡N 既 設： 5ng-TEQ/㎡N
	焼却能力：毎時4,000kg以上	新 設：0.1ng-TEQ/㎡N 既 設： 1ng-TEQ/㎡N
附則：既設施設に係る基準は、平成10年12月1日より平成14年11月30日までは80ng-TEQ/㎡Nとする。		

*ホソカワミクロン株式会社
（〒573-1132 大阪府枚方市招提田近1-9）
Tel. (0720)55-2231

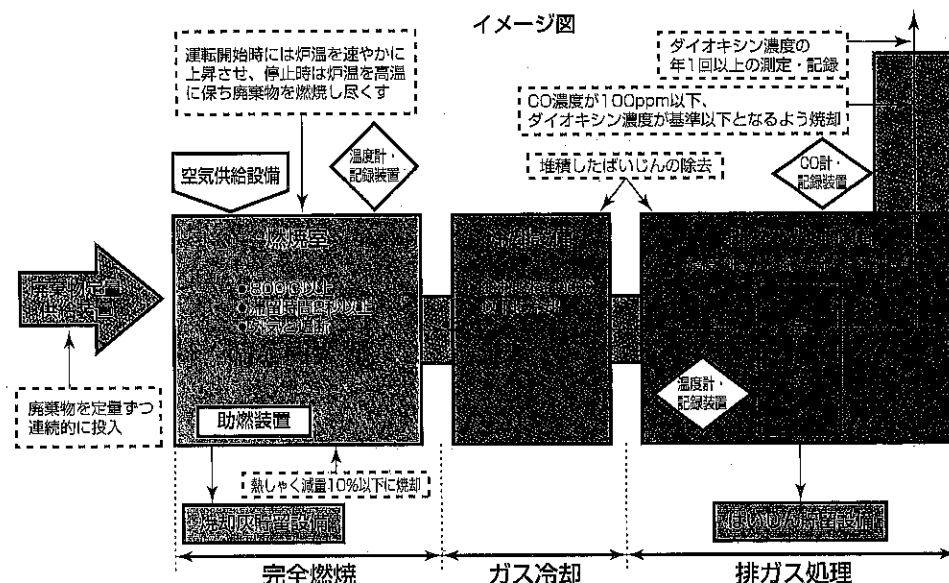


Fig.1 廃棄物焼却施設の構造・維持管理基準 (厚生省)

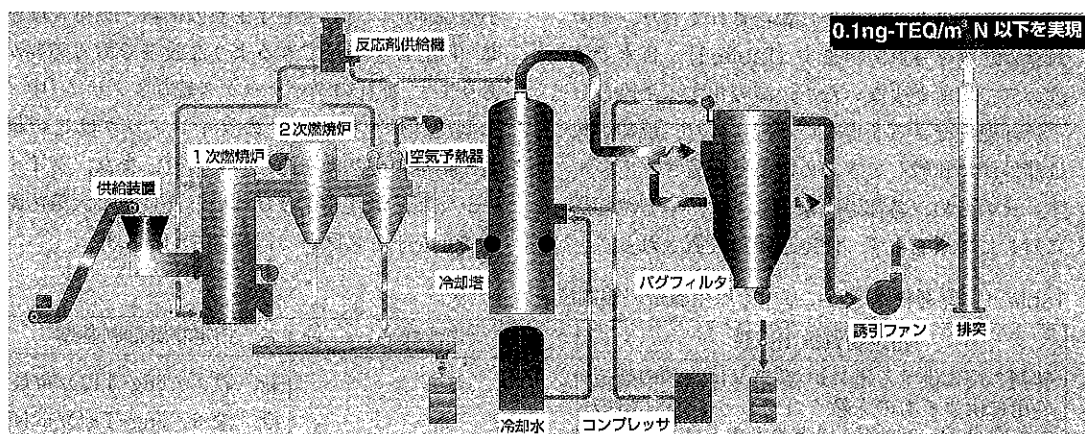


Fig.2 ダイナックス焼却システム

2. ダイオキシン類について

ダイオキシン類は、分解されにくい性質を有し、その毒性は、生殖障害や免疫抑制などの影響を人体に与える可能性が強い物質です。あらゆる物質から熱反発的にベンゼンが生じ、また、ベンゼンと塩素から塩化ベンゼンが生成します。ダイオキシン類はこの塩化ベンゼンから生成されます。最も発生しやすい温度域は300℃～600℃です。廃棄物には有機化合物と塩素が豊富に含まれているため、ダイオキシン類が生成しやすくなります。

3. ダイナックス焼却システムの特徴

3-1. ダイオキシン類の発生抑制技術

焼却設備で発生するダイオキシン類は、不完全燃焼と熱反応により生成する以外に、デノボ合成により2次的に生成するといわれています。デノボ合成とは、煙道や装置内に堆積したばいじん中の塩化銅等と排ガス中の未燃物質からダイオキシン類が生成する反応です。ダイナックスではこれら2つの発生要因の対策技術として以下のような点を考慮しています。

- ① 外気と遮断された状態で定量ずつ連続的に廃棄物を燃焼室に投入することにより、完全燃焼可能な安定した運転を行います (Fig.3).
- ② 燃焼室に助燃装置及び燃焼に必要な空気を供給できる設備を設置し、外気と遮断された燃焼室内で、燃焼ガスを温度800℃以上の状態で2秒以上滞留させ、不完全燃焼を防止しています (Fig.4). この時の、焼却灰の熱しゃく減量は10%以下になります.
- ③ 運転開始時には炉温を速やかに上昇させ、運転停止時には炉温を高温に保ち廃棄物を燃焼し

尽くします (Fig.5).

- ④ 冷却設備により燃焼ガス温度を約200℃以下に冷却します.
- ⑤ ライン中 (Fig.6) にばいじんが堆積しないような構造により、ダイオキシン類の2次的生成を抑制しています.
- ⑥ ばいじんを除去する高度の機能を有する排ガス処理設備としてパルスエアークレクタ (バグフィルタ) を設置しています.
- ⑦ 燃焼ガス温度及び排ガス中の一酸化炭素濃度の連続測定及び記録を行い、その濃度が100ppm

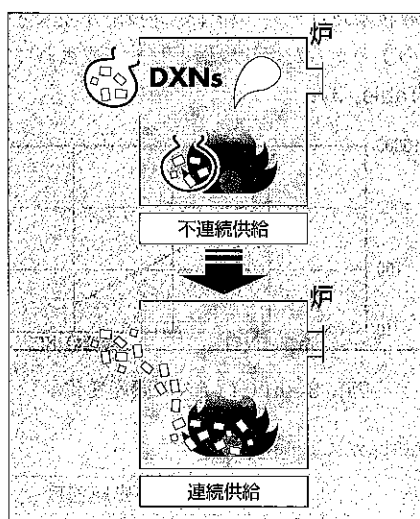


Fig. 3 供給方法

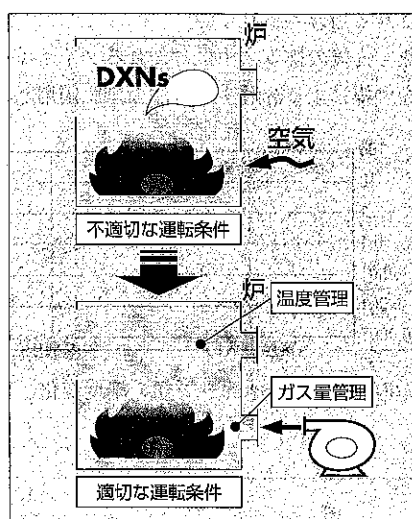


Fig. 4 完全燃焼

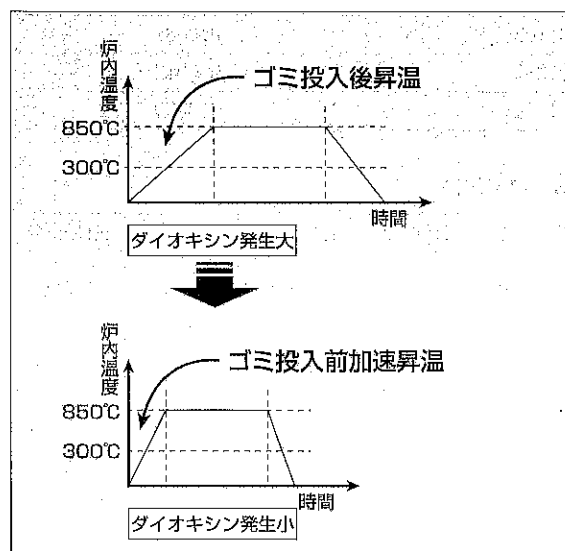


Fig. 5 炉温変化

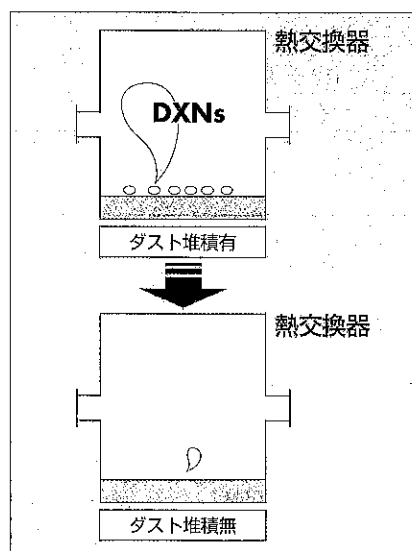


Fig. 6 ダスト堆積

以下になる運転を行い、不完全燃焼を防いでいます。

3-2. ダイオキシン類の除去技術

ダイオキシン類は、焼却設備における発生抑制の対策を行ってもやはり微量に生成します。そこでこれを除去・分解する技術として以下のような方法をとっています。

- ① 粉末状の活性炭系吸着剤を集じん機の前の煙道へ供給し、ダイオキシンの吸着を行う方法です。また、集じん後の排ガスを活性炭系吸着剤の充填層に通過させ、ダイオキシンをさらに吸着させる場合もあります。
- ② 集じん後の排ガス中に含まれるダイオキシン類を触媒により分解する方法で、脱硝用触媒を

改良した触媒を使用します。

これら2つの除去・分解技術は廃棄物やシステムに応じ、選択されます。

4. ダイナックス焼却システムの性能及び標準仕様

Fig. 7 及び 8 はダイナックス焼却システムにおける実測結果を表わしています。ダイオキシン類のみならず、その発生原因となる塩素も同時に除去できていることを示しています。Table. 2 はばいじんの高い除去性能を示す例です。ダイナックス焼却システムは、中・小型炉に対して燃焼・熱回収技術及びガス・粉体処理技術が注入され、1つのまとまった焼却設備として完成されています (Table. 3)。

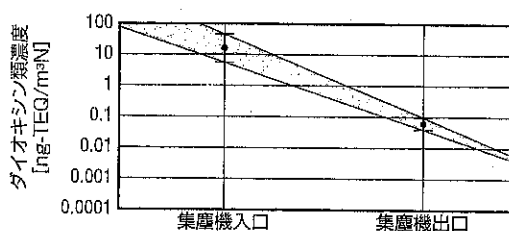


Fig. 7 ダイオキシン類の濃度変化

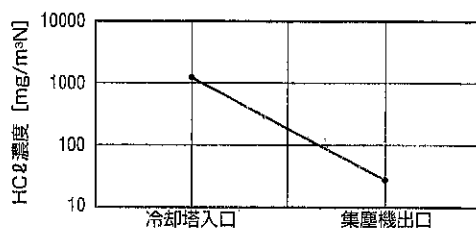


Fig. 8 HCl ガスの濃度変化

Table. 2 バグフィルタ性能 (焼却排ガス実測例)

用 途	集塵機入口媒塵濃度	集塵機出口媒塵濃度
	[g/m³N]	[g/m³N]
一般産業廃棄物	0.085	0.0066
医療廃棄物 A	0.105	0.0031
医療廃棄物 B	0.287	0.0012
プラスチック	1.18	0.0079

Table. 3 標準仕様

型 式		HD-i-100	HD-i-150	HD-i-200	HD-i-300	HD-i-400	HD-i-500
焼 却 処理法	プラスチック30% 一般雑芥 70%	[kg/h]					
		100	150	200	300	400	500
1 次燃焼炉容積	[m³]	4	6	8	12	16	20
2 次燃焼炉容積	[m³]	2	3	4	6	8	10
燃焼ファン	[m³N/h]	1000	1500	2000	3000	4000	5000
誘引ファン	[m³N/h]	3000	4500	6000	9000	12000	15000
反応剤使用量	[kg/h]	5	7.5	10	15	20	25
設備寸法 W×D×H	[m]	7.5×4×9	8.5×4×9	9×4×9	10×5×9	12×5×9	14×6×9

ホソカワミクロンサイクロミックス

研究開発部*

1. サイクロミックスの概要

サイクロミックスは、粉体技術のホソカワミクロングループがナウタミキサを始め、各種混合機によって貯えられた混合ノウハウを基に新たに開発したバッチ型の精密混合機である。

2. サイクロミックスの特徴

2-1 迅速な精密混合

サイクロミックスの性能は、特に凝集性の高い原料の混合において発揮される。その精度については後述するが、精密混合が要求される食品、化学、樹脂、トナー、粉体塗料の混合に最適である。

2-2 製品排出が容易（排出残が無い）

逆円錐型のケーシングを採用した、真下排出であり、ホソカワ独自の排出バルブ（イゼムバルブ、タンク底タイプ）との組み合わせによって、排出残の全く無い混合機となっている。

2-3 軸封部が混合領域外にあるため、シール部のトラブルが無い

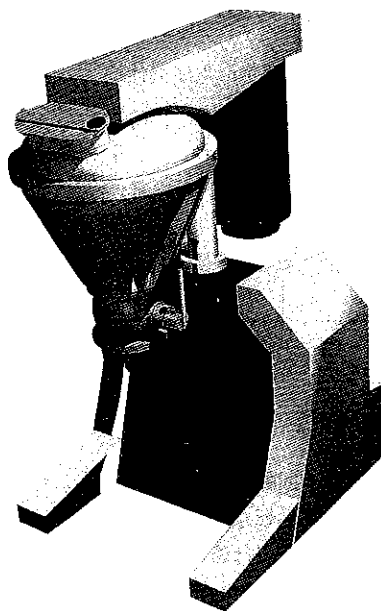
回転ロータを上部駆動方式としたため、混合原料中にシャフトのシール部がない。このため、従来の下部駆動方式や横軸型のタイプで発生していた、シール破損によるコンタミや軸受部のトラブルがなくなった。

2-4 洗浄が容易である

*ホソカワミクロン株式会社

(〒573-1132 大阪府枚方市招提田近1-9)

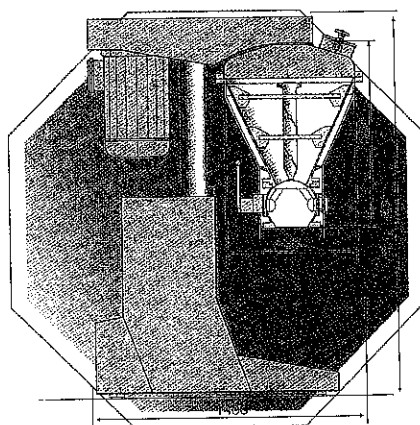
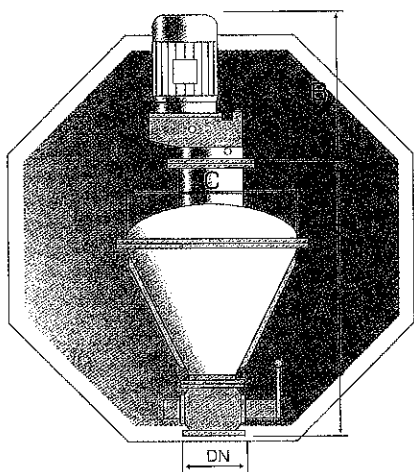
Tel. (0720) 55-2231



概して混合機は、その混合性能を重視するあまり構造が複雑となりがちである。サイクロミックスは、その開発段階より洗浄性を考慮し、機械の内外面ともできる限り単純な構造となるように設計されている。

2-5 冷却効率が高い

ジャケットと組み合わせることによって、サイクロミックスの持つ独特な混合原理と構造より、他の混合機と比較して非常に高い熱交換効率を持つ。低融点物質や熱によって変質する物質の混合にはジャケットに冷却水を流すことによってその内部温度をコントロールしながら運転できる。



ラボ用サイクロミックス

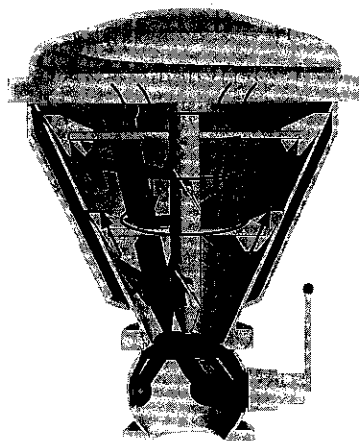
表1 生産機仕様

型 式	水張容量 [L]	動力(max) [kW]	主要寸法 [mm]			
			A	B	C	D N
50	50	15	1088	713	650	150
150	150	22	1523	823	950	200
500	500	55	2187	1178	1400	300

3. 混合原理

1. パドルが回転することによって、投入原料もパドルの回転に伴って回転する。
2. 回転する原料は遠心力を与えられ、外側に移動しケーシングに沿って回転する。
3. ケーシングが逆円錐型になっているため、遠心力によって外側へ移動しようとする原料は上昇を始めるが、パドルによって与えられる速度は上部程速く、加速される。原料が加速する際にケーシングとの間に摩擦力が生じ、この摩擦力が原料に強いせん断力を与える。
4. 原料が、パドルの位置しない部分まで上昇すると今度は一転して、加速より減速に転じる。
5. 減速していく原料は、上部のドーム状のカバーとガイドに沿って中央部に戻される。
6. 混合機の中心部では、原料は下降し混合機底部でスクレーパにたたかれ、再度ケーシングに沿って上昇して行く。

7. 上記の運動が繰り返されることによって精密混合が促進される。



混合原理図

混合に最適配列されたパドルを取り付けたサイクロミックスは、付着性の高い原料や、粉体をコーティングしたい時に最適な、高せん断力を持った混合機といえる。

サイクロミックスの原理は先に述べたように、ロータの回転と逆円錐型のケーシングの壁面に生じる摩擦のコンビネーションによる混合運動を基本としている。しかし、原料によってはこの摩擦によって発生する熱のためメルトしたりして長時間運転できなくなるものがあるが、熱の発生を押さえるために、サイクロミックスはジャケットを装備しており製品を効率よく冷却しながら運転することができる。また、混合プロセス上、熱エネルギーを更に必要とする場合は、このジャケットを加熱に使用することもできる。

このように、迅速かつ強烈な混合効果をサイクロミックスは提供することができる。

4. アプリケーション

サイクロミックスは全ての粉粒体に加えて、ペースト状の物質や湿粉までの混合に適応することができる。特に凝集性のある製品に対しては非常に効果的である。一般的に、このような凝集性の強い粉体は比重が小さく粒度も細かく、原料の移動によって生じる静電気や、水分の毛管現象やなどによって容器内にブリッジが発生したり混合すべき粒子同士が固まる傾向にある。サイクロミックスの持つパワーとスピードが、これらの凝集塊やブリッジを壊すのに十分なせん断力を与える。

特許一言メモ No.169

低い大学の特許取得意欲？

米大学の特許出願件数は日本の大学の40倍以上—こんな結果が特許庁などの調べで明らかになった。日本の大学は特許取得意欲が低いとされるが、これを改めて裏付けた格好。大学の研究成果の特許化を手助けする技術移転機関の設立が国レベルで検討されているが、米国並みの特許流通システムを作ることは容易ではなさそうだ。

特許庁によると、95年の日本の大学の特許公開報件数は119件。米大学の場合、技術移転事業の支援機関である大学技術管理者協会による調査

で95年に5,100件の出願があった。

米国では80年以降、大学の研究成果の特許化して産業界に流通させる仕組みを整備しており、日本テクノマートの調べによると94年の米大学の特許取得件数は1,862件に上っている。また、米大学技術管理者協会は、95年に大学など研究機関からの技術移転で年間1,169社の新会社が生み出され、200億ドルの経済効果があったと見積もっている。(日経 10.2.14より)

ホソカワ ニュース

◎アルピネ 創業100周年

(平成10年10月)

ホソカワのグループ会社であるH. アルピネ社が、今年創業100周年を迎え、10月16日ドイツの 아우グスブルグ市において盛大な記念祝賀会が催されました。

社員とその家族に社内施設が開放され、市内を走る市電(トラム)で回遊を楽しみ、工場内で園遊会などが催されました。夜は場所を移し、招待客夫妻を中心に千名余参加による豪華祝祭式典となりました。市長の挨拶に続き、H. アルピネ社フォーゲル社長、細川会長、佐藤HMII社長の挨拶が行われ、その後、夜を徹してダンスパーティーが催されました。その舞台の背景には、ビデオによりアルピネ社の歴史の1コマ1コマが綴られ、当地でも異例の長い歴史を持つ会社として紹介され、町の発展と共にしっかり地域に根ざした会社の姿がそこにありました。



◎ISO 9001認証取得

(平成10年9月)

当社は、平成10年9月23日付で、「ISO 9001」を正式に認証取得しました。



◎第32回 粉体工学に関する講演討論会

(平成10年8月)

8月27日(木)、ホテルラフォーレ東京(東京都品川区)において「第32回 粉体工学に関する講演討論会」が開催されました。

今回は粉体の造粒/粒子設計にポイントをあて、特に医薬品および食品工業における基礎/応用技術について講演がなされ、当社から、技術開発 辻本広行氏による「流動層応用装置による新しい造粒・コーティング技術」の講演が行われた他、興味深い講演と熱心な討論で盛会となり、終了後の懇親会では歓談の輪が広がりました。

〈参加者数〉

◇社 外 (ユーザー)	160名
◇大学および研究機関	20名
◇ホソカワ関係	約 30名
合 計	約210名



◎'98 国際食品工業展

(平成10年 6月)

'96年 6月以来、2年ぶりの同展示会への出展となった今回は、前回と比較して、非常にHACCPが注目を浴びていた事が特徴的でした。'96開催時にはHACCPを取り上げていた企業が一部に有りましたが、今回は注目というよりもむしろ、導入の必要性に欠ける、との認識では無かったのでしょうか。時間の推移とは恐ろしいもので、今回の展示会では、ゼネコン各社がPRする所、必ず人だかりが出来、その熱の上がり具合に唖然とする思いでした。



◎アヘマシア '98 およびファーマセミナー報告

(平成10年 5月)

5月11日～16日、北京にてACHEMASIA '98が開催されました。

ACHEMASIAは、3年に1度ドイツで開催される世界的な化学機器展示会、「ACHEMA」のアジア版ということでACHEMAの翌年に北京で開かれ、今回で4回目となります。当社は第1回より参加しており、今回はドイツ、米国、オランダのグループ会社7社からも参加し、様々な顧客からの要望、質問に的確に対応することができました。

来場者数は当局発表によると前回の11%増の19,000人とのことです。実際にははるかに少なかったと思われます。原因としては、①中国での展示会開催が過剰気味で、以前のような新鮮味が感じられなくなっていること。②アジアの経済危機の影響が中国企業にも少なからず出てきており、設備投資関連にかげりが見られること、など

によると思われます。

それでも、当社のブースに化学工業省次官が突然訪問され、その様子が当地のテレビで放映されるなど、話題性に富んだものとなりました。

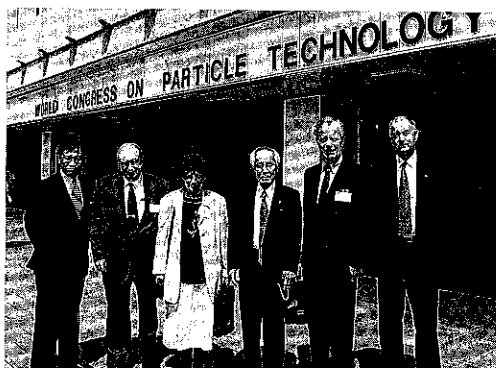
北京での展示会のあと、昨年9月にオープンした弊社上海事務所の開設を記念して、5月18日には上海で近隣の薬品企業40社を招待してファーマセミナーを開催し、成功裡に終了しました。



◎第3回 粉体工学世界会議のオープニングスピーチ

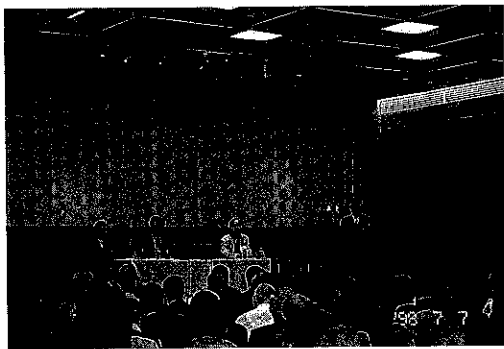
(平成10年 4月)

7月6日より4日間、英国ブライトンで第3回粉体工学世界会議が開催されました。今回は36カ国から約700人の参加があり、約400件の論文が発表されました。参加者は英国が約3割、続いてド



イツ、日本、米国がそれぞれほぼ同数で、この4カ国で全体の約3分の2を占めていました。

当社細川益男会長が、この世界会議、開会式のオープニングスピーチを仰せつかるという名誉を授かりました。このような学会の世界会議で、企業人による開会挨拶というのは大変珍しく、これは、弊社が早くから粉体工学・技術の育成・発展に大きく貢献し、この分野での国際的事業展開、ならびにKONA誌の発行等に見られるような学術支援面でのグローバルな活躍が認められたためと自負しております。



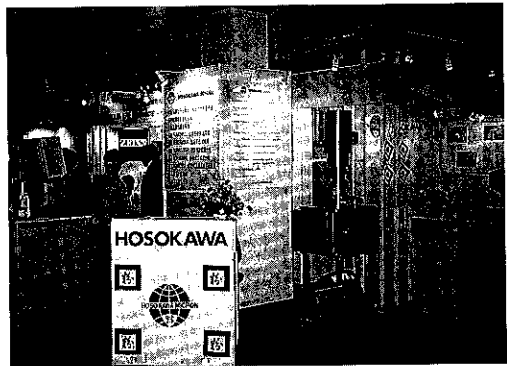
◎ファインセラミックスフェア '98

(平成10年3月)

ファインセラミックスフェア '98が、3月11日～14日、名古屋・吹上ホールで開催されました。

セラミックス関連のメーカーが集中する地域での展示会であり、盛況で且つ地域性豊かなものになりました。また、技術セミナーでは研究所の横山豊和所長による「新型パウダテストPT-Rの特徴と応用」のテーマでセラミックスの粉体特性についての講演が行われました。

ホソカワの小間では、パウダテスト、エアージェットシーブ、FPIAの3機種を展示しました。他のメーカーは材料展示がほとんどであり、測定機のPRには効果的な展示となりました。今後の展開が期待されます。



◎日本粉体工業技術協会 協会賞（技術賞）受賞 (平成10年5月)

今年、長年協会活動を通じ粉体工業技術の振興発展に特に功績のある者へ与えられる賞である、日本粉体工業技術協会 協会賞（技術賞）を、当社研究所の中川文雄氏が受賞いたしました。

「協会の事業の1つである標準粉体の製造・頒布において、長年製造責任者として従事してきた事を評価して頂いたものと思っております。」（当人コメントより）

“粉砕”誌投稿規定抜粋

1. 原稿の種類

1.1 研究報告

粉体工学に関連する完結した研究で、他誌に未発表のもの、和文の著者摘録と英文要旨をつけて下さい。また図表の説明は英訳して下さい。なお、研究報告には査読があります

1.2 技術報告

粉体工学に関連する工業化試験、工業装置の運転あるいは設計法に関する研究成果をまとめた内容のもの、なお、技術報告にも査読があります。

1.3 総説(解説および講義も含む)

粉体工学に関連あるいは寄与する分野の解説的記事。この場合特に著者の意見や見解を盛り込んだ入門的のわかり易く説明したもの。

1.4 参考資料

粉体工学に関連する研究や調査などのメモ、記録、あるいは装置の設計、運転、測定等に必要と思われる内容をもつもの。粉体工学に関連する問題に対する意見あるいは討論、本誌に発表された研究論文に関する補遺あるいは意見を記述したもの。

1.5 文献紹介

粉体工学に関連する文献の紹介、紹介者の意見や批判を適当におりませたもの。

1.6 随筆

1.7 その他

2. 原稿の編集

1) 研究報告および技術報告につきましては査読委員の査読結果に従って訂正を求めることがありますので御協力下さい。

2) 原則として年1回発行します。

3) 抜刷を御希望の場合は編集事務局へ御連絡下さい。実費にてお頒けいたします。

4) 掲載済の原稿は返却いたします。

5) 掲載しました原稿に対しては若干の稿料を送らせていただきます。ただし、研究報告および技術報告は原則として抜刷50部贈呈し、稿料は支払いません。

◎連絡先

〒573-1033 枚方市招提田近1丁目9番地

ホソカワミクロン株式会社 粉体工学研究所

“粉砕”編集事務局宛 (Tel 0720-55-2220)

原稿募集

“粉砕”誌の原稿を募集いたします。粉体工学に関係する研究報告、技術報告、総説、参考資料、文献紹介、随筆など特徴ある記事をふるって御投稿されるようお願いします。ご一報いただきましたら、原稿用紙をお送りいたします。

次号発行予定 平成11年11月末日

原稿締切 平成11年8月末日

編集後記

* (財)ホソカワ粉体工学振興財団主催、ホソカワミクロン(株)後援で、「第31回 粉体工学に関する講演討論会」が平成9年8月28日、大阪・千里ライフサイエンスセンターで開催された。そのご講演6題を特集として本誌に掲載した。

今回はテーマとして「環境保全技術と粉体工学」を取り上げ、熱心な講演と討論がなされた。

* この講演討論会の企画を担当する粉体技術談話の発足時(昭和44年)からのメンバーとして、色々とご指導をして頂いた井伊谷鋼一教授(京都大学名誉教授、(株)日本粉体工業技術協会相談役)が平成10年11月6日亡くなった。先生は粉体工学の偉大な指導者の一人であり、日本だけでなく世界的にも著名な学者で、粉体工学会および(株)日本粉体工業技術協会の設立ならびに運営に大きな貢献をされ、日本の否世界の粉体工学を引っ張ってこられた。先生のご冥福をお祈りする。(合掌)

* 粉体技術談話会主催、ホソカワミクロン(株)後援で平成10年1月14日、東京・中央大学駿河台記念館に於て「第4回 ホソカワ粉体工学シンポジウム」を開催した。その概要と討論の内容をニュースとして本誌に掲載した。

(F・N)

“粉 砕” No.42 1998年

平成11年1月20日 印刷

平成11年1月25日 発行

編集発行責任者 横山 豊 和

発行所 ホソカワミクロン株式会社

粉体工学研究所

大阪府枚方市招提田近1丁目9

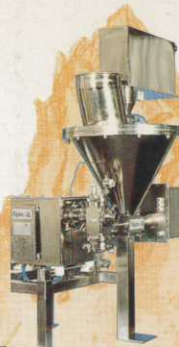
印刷所 ナニワ印刷株式会社

大阪府北区天満1丁目9-19

最高峰を形成する製品群 山麓に広がる周辺技術 粉体技術のホソカワ

医薬品機器

カウンタージェットミル
ファインインパクトミル
ファーマバクタ+フレーククラッシャ



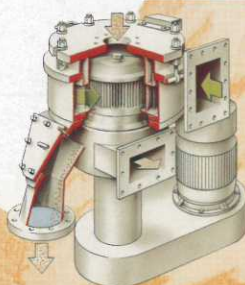
混合機

VNミキサ
サイクロミックス
タービュライザ



分級機

ミクロンセパレータ
TSPセパレーター
ターボブレイクス



造粒機

アグロマスタ



粉碎機

イノマイザ
ACMパルペライザ
ミクロンジェットT型



直接成形焼結装置

真空型メカノフュージョン



粉体測定機

イースパートアナライザ
アグロボット
パウダテスタ



供給排出機

ストット充填計量装置
バルクタップナ



その他、当社は各種粉体機器を豊富にとり揃えています。

プロセステクノロジーで未来を拓く



ホソカワミクロン株式会社



〒541-0048 大阪市中央区瓦町2丁目5-14 TEL.(06)6233-3960 FAX.(06)6229-9250
〒173-0004 東京都板橋区板橋3丁目9-7 TEL.(03)5248-5700 FAX.(03)5248-5709