総 説

都市ごみの再利用

河 村 光 隆*
Mitsutaka KAWAMURA

1. はじめに

日常生活から廃棄される廃棄物（一般廃棄物）は形状、比重、材料、大きさなどの物性が多岐にわたる混合物である。わが国では昭和54年度で人口1人1日当りの都市ごみ排出量は全国平均824 g、総排出量は95,746 t/日と推計されている。ごみの成分表示は一定した表式はなく、自治体によって表示法は異なる。現在この廃棄物を資源として各成分に分離し再生利用をはかる試みが世界各国で鋭意検討されている。都市ごみは多成分混合物であるから、資源として利用するため通常はそれを各成分毎に分離して回収し、各成分を利用するという方法が

とられる。都市ごみを再生利用する技術を上記観点から合目的に構成したものを技術システム、その中で各成分を分離するプロセスを前端システム、分離した成分を転換ないしは精製して市場規格へ変換するプロセスを後端システムと称する場合がある。現在進められている技術開発はごみ成分特性に適した単位操作の開発と前端システムを導入した技術システム特性の最適化を積極的にはかろうとしている点の特徴である。

前端システムにおいて都市ごみ各成分の分離に用いられる単位操作は機械的なものが多いが、その代表的な例を表1¹⁾に示す。表1に示すように利用できる分離操作はすべてごみ成分の分離に試みられている。しかしこれ

表1 都市ごみ分別に適用される分離単位操作¹⁾

操 作	環 境	利 用 す る 物 性	装 置	適 用	文 献
篩 分	乾	粒 径	トロンメル 振 動 ヨ ウ 動 確 率 カスケード分別機	一次選別 不純物除去	1, 12, 13, 21
篩 分	湿	粒 径	シーブベント	センイ回収	33
風 力 分 級	乾	空気力学的抵抗力	垂 直 水 平 ろ 過 篩 型 コンベアー型	破 碎 物 一次選別	3, 15, 16, 17, 18 14, 20
水 力 分 級	湿	流体抵抗力	上昇流分級器	二次選別	39
浮 沈 分 離	湿	見掛比重	ドラム型 コーン型 磁性流体	有機物無機物分離 プラスチック種類分離 異種金属	21
流 動 床 分 離	乾	見掛比重	流 動 床	非鉄金属からアルミの分離	40

昭和57年8月19日受付

* 化学技術研究所(〒305 茨城県筑波郡谷田部町東1-1)
TEL 0298-54-4728

ジ	グ	乾 湿	見掛比重	ダイヤフラム式 ピストン式 空気加圧式 網上げ下げ式		36
選 別 破 碎	乾	破碎抵抗（脆性，展性）	ハンマーミル	ガラス・セラミックスと 金属の分離	10, 4, 5, 6, 8, 21, 20	
	半湿式	湿分差による破碎抵抗	半湿式破碎選別	厨芥，紙，プラスチック の分離	7, 21, 37, 38	
選択パルプ化	湿	水中での破碎抵抗	ハイドロパルパー サイクロン 篩	プラスチックとセルロー スの分離	37	
反 撓 分 離	乾	反発係数	反 発 式 回転ロール式	疎・密粒子分離	21	
慣 性 分 離	乾	慣 性 力	機 械 式	重いものと軽いものとの 分離	21, 20	
形 状 分 離	乾	形 状	傾斜テーブル	ビンの分離	42	
ス ベ リ 分 離	乾	マサツ係数	WSL-thrasher /separator	微粒子部分の分離	1	
ク シ 刺 分 離	乾	硬 度	機 械 式	フィルムと固まりの分離	21, 20	
付 着 分 離	乾	付 着 性		紙とプラスチックの分離		
磁 気 分 離	乾	磁 性	ド ラ ム ベ ル ト	鉄・カンの分離	19	
静 電 分 離	乾	電気伝導度	ド ラ ム	紙とアルミの分離	44	
マサツ電気分離	乾	帯 電 性		プラスチックの種類選別	22	
電気力学分離	乾	電気伝導度	ドラム型	非鉄金属中のアルミ回収	24, 25, 26	
光 学 的 分 離	乾	異なる波長に対する反射 率 透 過 率		ガラスの色による分別	37, 41	
浮 選		表面疎水性		無機物中のガラス回収	34	
				プラスチックの種類選別	23	

らの機械的操作単独では望む純度の物質が分離できないので通常複数の単位操作を組み合わせて分離操作のシステム化が計られることになる。したがってシステムの目的を明確に設定すれば最適な分離システムの合成が理論的には可能となる。しかし実際はごみ特性の定量的な記述が困難であるため、システム合成は経験的なものとなっている。現在提案されている前端システムの主なものを表2に示す。分離方法としては始有有機物、無機物、金属、非金属などに粗分別を行ない、次の段階として各回収成分に適した精選分離の方法がとられる。粗分別は二三の例を除いて破碎、篩分け、風力分別、磁選で構成さ

れている。表2のシステム合成は理論的に構成されたものではなく、経験的にごみ特性と回収物の利用環境から作られたものである。したがってシステム間の性能の違いばかりでなく、各システムそれ自体の性能の定量的評価ができない状態にある。システムの理論的合成を困難にしている側面はごみが多成分混合物でしかも統計的性質を有しているため、ごみの性質を定量的に記述するには多くの変数を必要とすること、またシステム合成の各単位操作の多成分混合物に対するモデルが確立していないことがあげられる。再利用システムに関する報告は数多く^{20, 21, 30, 31, 37, 38)}あるので、ここでは主にごみに関する

各種分離操作の中で特に重要な篩分け，風力分別，破碎操作に関する研究の現状について述べる。

2. 多成分分別操作

ごみ成分の分離操作では，実験的には結果の表示をニュートン効率などで成分分離効率を記述しているが，原料中の特性変数分布に基づく理論最大効率については言

及されていないのが通常である。Kox ら¹¹はこの点を指適し，分別性能を定量評価する指標として部分分離率曲線を基にしたニュートン効率が都市ごみ成分分別にも適用できることを述べている。分離操作において着目する分別性質の種々のプロセス内流れにおける分布関数 $n(x)$ は次のように定義される。

$n_i(x)dx = i$ プロセス流れにおいて，成分のある特

表2 分別システム³⁸⁾

(表 2 のつづき)

(注)

	物 質	装 置	システム
MSW	都市ごみ	Mg. S 磁力選別機	Com. Sub 堆肥化サブシステム
I	第Ⅰ成分	Air S 風力選別機	Me. Sub メタン化サブシステム
Ⅱ	第Ⅱ成分	Cru 破碎機	Pyro. Sub 熱分解サブシステム
Ⅲ	第Ⅲ成分	Sc 篩	G.R. Sub ガラス回収システム
RDF	都市ごみ燃料	Pe 造粒機	Al.R. Sub アルミ回収システム
U	篩下成分	Hu 加湿機	Pulp. Sub パルプ化システム
O	篩上成分	Tro トロンメル	Feed Sub 飼料化システム
L	軽成分	Ba 反撾式分別機	R. Sub 精選別システム
M	中間成分		
H	重成分		
G	ガラス		
N-Fe	非鉄成分		
Re	残渣		

性変数 x が x と $x+dx$ との間の値をとる粒子の割合

この時分離の部分分離効率関数 ϕ は,

$$\phi(x) = r \cdot n_r(x) / n_F(x) \quad \dots\dots(1)$$

で定義され、 $\phi(x)$ の値は 0 と 1 の間の値をとる。ここで r は r 流れの原料流れ F に対する重量比である。多成分混合物の 2 分別操作について、Kox らは多成分混合物を着目する成分 A とその他の成分 B の擬 2 成分系として近似し、ニュートン効率 E を

$$E = |r_A - r_B|$$

$$= \left| \int_0^\infty [\phi_A(x) n_{AF}(x) - \phi_B(x) n_{BF}(x)] dx \right| \quad \dots\dots(2)$$

で与えた。 ϕ はたとえば Sender ら³⁾ が風力分級機に対して、Kolomorgov, Fokker-Planck (KFP) の式を適用して求めた分離曲線 ϕ

$$\phi(v) = \frac{lw(v-w) - klw + klvw eu Z_2/D}{lw(v-w) - klvw + [klvw + kv(v-w)] eu (Z_1 + Z_2)/D} \quad \dots\dots(3)$$

w : 重成分の塔底における自由落下速度, u : 粒子絶対平均速度, v : 軽成分の塔頂での流出速度 $\sim$ 風速, Z_1, Z_2 : 原料供給点からそれぞれ上流, 下流への分離帯長さ, D : 混合係数, k, l : 定数

を適用すれば風速 v をパラメータとして風力分級機の理論的分離効率を求めることができる。このように分離装置の分離機構が理論的モデルで記述できるならば, 多

成分分別装置の性能評価が可能となる。理論的に ϕ を求めることができない場合, ϕ, E の定義式に従って実験的に定めることができる。Kox らの自動車破碎残渣物を篩分けと風選した場合の各成分の部分分離効率と特性変数との関係の例を図 1, 2 に示す。この場合, 全体に篩分け操作は風力分別操作と比較して分離効率の値は小さい。

3. 破碎操作

ごみ粒子径が大きいものになると, 500 mm 以上にもなるので破碎操作ではごみハンドリングのため最大粒子径をある限度以下にすると同時に, 下流での分別操作を容易にするため選択破碎を行なわせる。

図 1 風力分級機における各成分の部分分級効率³⁾
Fe: 鉄, N-Fe: 非鉄金属, Ur: ウレタン,
Pl: その他のプラスチック

図2 篩における各成分の部分分離効率²⁾
Fe: 鉄, N-Fe: 非鉄金属, Ur: ウレタン,
Pl: その他のプラスチック

3.1 都市ごみ破碎特性

都市ごみを破碎した時、破碎機構の違いによる碎生物粒度分布の違いについては、都市廃棄物資源化研究会⁴⁾、Savage ら⁵⁾の報告がある。立型ハンマーミルで破碎した場合の成分別碎生物篩分け粒度分布の一例を図3に示す。土石・厨芥類は紙・プラスチック類に比べて選択的に破碎され、粒径が小さくなっている。図4は破碎機の種類を変えた場合の碎生物粒度分布を示したものである。A、Bは立型ハンマーミルであるが構造が異なり、Cはロール型剪断破碎機である。B型はプラスチックを

図3 一次破碎碎生物粒度分布例⁴⁾
E: 土石類, G: ガラス, Fe: 鉄, Pa: 紙,
W: 木材, Pl: プラスチック, Fi: 繊維類,
N-Fe: 非鉄金属, T: 合計

図4 破碎機の違いによる碎生物粒度分布⁴⁾

図5 6都市碎生物粒度分布⁵⁾

図6 分別率と破碎時間の関係⁷⁾

選択的に破碎しないことが特徴として読みとれる。Savage らは米国6都市で試験した破碎機の結果について図5に示すような碎生物の篩分け粒度分布を与えている。伊藤ら⁷⁾は含水率の違いによる破碎強度の差を利用した半湿式破碎選別機を開発したが、ごみの破碎特性を破碎時間または破碎帯長と分別率との関係で表わしている(図6)。

3.2 多成分混合物破碎理論

Obeng ら⁸⁾はこのような多成分混合物の破碎につい

て、破碎過程を Callcott⁹⁾ が展開した行列による表現を適用して、破碎の選択関数 $s(x)=\pi$ (一定) として、かつ破碎は破碎行列 B で表わされるとして碎生物粒度分布行列 P を、

$$P = \{\pi B + (1 + \pi)I\} f \quad \cdots \cdots (4)$$

で与え、シミュレーション法により実験との比較を行なった。実験では 10 ton/h 能力のスウィングハンマーミルを用いて供給量を 1~10 t/h 変えて破碎し、碎生物の粒度を篩分け法により定めた。また破碎関数 B は Broadbent-Callcott が求めた式、

$$B(x, x_0) = \{1 - \exp[-(x/x_0)^n]\} / [1 - \exp(-1)] \quad \cdots \cdots (5)$$

と Gaudin-Meloy 分布式

$$B(x, \bar{x}_0) = 1 - (1 - x/\bar{x}_0)^r \quad \cdots \cdots (6)$$

を用いて π を定めた結果、(4)式は実験結果を良く表わすことを示した。

3.3 破碎機滞留量

Shiflett¹⁰⁾ らはハンマーミルについて破碎機滞留量 H (kg) を破碎処理量 Q (ton/h) との関係について実験的に検討し、 Q と H との間に

$$Q = f[1/(g_s \cdot A \cdot A_{tot})] H^a \quad \cdots \cdots (7)$$

なる関係を見出した。ここで g_s は格子間隔 (m), A : 格子間開口面積 (m²), A_{tot} : 格子を含む全面積 (m²), a : 実験指数である。 $g_s=1.3$ cm の時 $a=0.95$ 程度の数値を与えている。

3.4 必要破碎比エネルギー

Savage ら⁶⁾ は実規模破碎機で得られたデータを基にして必要破碎比エネルギー E_{ow} (kwh/Mg) と粒度 x (cm) との関係について回帰分析を行ない、

$$E_{ow} = 17.91 x_0^{-0.90} \quad \cdots \cdots (8)$$

$$E_{ow} = 35.55 x_0^{-0.81} \quad \cdots \cdots (9)$$

を得た。ここで x_0 は碎生物 63.2% 篩通過径, x_{90} は 90% 篩通過径である。すなわち碎生物粒度を小さくしようとする場合、必要破碎比エネルギーは増大する。

3.5 動力と湿分の関係

Savage らはさらに正味動力 P_n (kwh), 含水率 m (-), 処理量 Q (Mg/h) との関係について多変量回帰分析を行ない、上述変数の間は、

$$P_n = a Q^b (1 - m)^c \quad \cdots \cdots (10)$$

なる関係で表わされることを示したが、 a, b, c は表 4 に示すように、破碎機の種類によって大幅に変動している。 $c < 0$ ならば P_n は m が増大するにつれ低下することになる。Savage らの考察によれば消費動力と破碎機内部構造との関係はハンマーミルの場合、ハンマーの数が小さくなる程消費動力は小さくなることを示唆した。また滞留量と消費動力は(7), (10)式から、滞留量がふえれば消費動力は増大する。したがってハンマーミル格子構造が消費動力に大きく影響することが推察される。このほか、Shiflett ら¹⁰⁾ はフライホイールも含めた必要動力の計算式を求めている。

表 3 試験した破碎機⁹⁾

場 所	破 碎 機 形 式	平均処理量 t/h
Appleton, WI	横型スイングハンマーミル	24.8
Ames, IA	〃	18.6
Cockeysville, MD	〃	49.5
Great Falls, MT	立型スイングハンマーミル	14.8
Tinton Falls, NJ	立型リング破碎機	60.8
Odessa, TX	横型スイングハンマーミル	82

表 4 回帰分析による a, b, c の値⁹⁾

剪 断 機	相関係数	データ数	a	b	c
Appleton	0.85	11	6.33	0.94	1.54
Ames	0.74	10	0.62	1.2	-7.04
Cockeysville	0.91	12	21.85	0.9	2.25
Great Falls	0.28	12	39.97	0.27	-0.63
Tinton Falls	0.85	12	4.05	0.94	1.66
Odessa	0.91	12	0.14	0.84	-12.64

4. 篩分け操作

篩分け操作は特に破碎操作と組み合わせて、成分を抽出する操作、あるいは風力分別など操作のための原料粒度調整のため頻繁に使用される。都市ごみ分別で特に使われている篩はトロンメルである。トロンメルは破碎機の負荷を減ずるため、破碎操作前に据えられる¹¹⁾こともある。逆に都市ごみハンマーミルで解袋した後に、灰成分を除去するための一次分離装置として用いられる場合もある。トロンメルの特徴は転動運動による破碎効果を有する点で、内部に攪拌槽を設け、一層この特徴を生かした装置も開発されている。トロンメルの実ごみに関する分別実験については Bernheisel ら¹¹⁾、Warren ら¹²⁾の報告がある。また Alter¹³⁾ はトロンメル内の粒子運動軌跡と篩分け確率とを組み合わせてトロンメルを設計する手法を提案している。Alter のモデルでは、処理量、トロンメル内堆積厚さ、かさ密度、トロンメル傾斜角が与えられた場合、所定の部分分離効率を達成するのに必要な衝突回数、その衝突回数を達成するトロンメル長、トロンメル径、トロンメルの回転速度が求められる。しかし彼のモデルでは粒子個数基準で、通常測定されている重量基準ではないこと、トロンメル内のかさ密度データがないこと、篩分け効率に影響するごみ粒子形状を考慮していない点で、実験結果と合わない恐れがある。したがってごみの粒子基準粒度分布ならびに形状分布の特性化を行なう必要がある。

5. 風力分別操作

風力分別は形状、粒径、密度を含む空気力学的特性の差を利用して分別する操作である。風力分別は通常破碎操作の後に位置し、都市ごみの中で有機物軽成分を回収する機能を果たすが、風力分別では空気力学的に軽い物質と重い物質とが分かれる機構であるため、必ずしもこの操作が有機物回収目的を完全に満足するとは限らない。風力分級機の形式として大きく分けて立型と横型がある。横型は立型に比べ分離帯が短かく、分離帯で受ける力の差が運動軌跡として現われるのを利用して分離するので慣性力分離も同時に利用していることになる。横型風力分別機は空気力学的多成分分別が同時に行なえることが特徴である。形状が球の場合、粒子同士の干渉がなければ分別機内での粒子軌跡は簡単に計算できるので、その場合の分離効率は理論的に求められる。しかしごみの形状、比重は一定していないし、また粒子干渉効果も実装置では存在するので、実験的に粒子径と飛距離との関係を求めて設計する方法がとられる。武富ら¹⁴⁾は単体

試料を用いて粒子径と飛距離の関係を速度をパラメータとして求め、その値からごみを風力分別した時の分別組成について推算し、実験値と比較した結果、±20%以内で一致することを示した。

立型風力分別機に関しては分離帯が長く、分離精度がすぐれていること、広い適用範囲があることなどから理論的にも実験的にも数多くの研究がなされている。

Rumps Jr.¹⁵⁾ は風力分級操作に関して蒸留塔での分離操作のアナロジーから塔頂での重成分は、

$$X_i = Y_i / \alpha_{ik} / \sum (Y_i / \alpha_{ik}) \quad \cdots \cdots 03$$

から求め、また塔底での平衡にある軽成分は、

$$Y_i = \alpha_{ik} X_i / \sum (\alpha_{ik} X_i) \quad \cdots \cdots 04$$

で求めて、逐次塔頂、塔底から X_i 、 Y_i を決定する方法を提案している。ここで比揮発度 α_{ij} は重粒子と軽粒子の擬比揮発度 β と

$$\alpha_{ij} = \beta_{ji} / \beta_{ii} \quad \cdots \cdots 05$$

で関係づけ、また β は二成分について実験データの回帰分析から

$$\beta_{ij} = 2(\rho_i / \rho_j)^2 \exp [41.2(d_i d_j)^{3/2}] \quad \cdots \cdots 06$$

の相関を与えている。

Sender ら³⁾ は立型分級機内における分離過程について、対流粒子輸送と混合輸送の2つの輸送機構が起こるとし、Molerus が展開した KFP 方程式に関して新しい境界条件を導入して平均滞留時間および分離効率関数を導いている。平均滞留時間 τ は近似式として

$$\tau(u=0) = \tau_0 = \frac{L}{2v} \frac{2 + \frac{3}{2}(k+l)S + k l S^2}{k + l + 2k l S} \quad \cdots \cdots 07$$

$$\tau(u \gg 0) = \frac{Z_2}{2} + \frac{D}{k u v} \quad \cdots \cdots 08$$

$$\tau(u \ll 0) = \left| -\frac{Z_1}{u} \right| + \frac{D}{l |u| w} \quad \cdots \cdots 09$$

ここで、 $S = vL/2D = wL/2D$ L : 分離帯長

と与えている。 $|u| < 10^{-2} \text{ m/s}$ の軽粒子について滞留時間は混合係数 D と出口流出係数 l で決まり、混合度が低下すると軽粒子の滞留時間は増加する。また出口流出係数 l が低下すると軽粒子の平均滞留時間は増加する。Sender は、分離効率を高くするためには、塔頂出口速度を小さくすること、分離帯での粒子混合を抑制することを示唆した。実験は $0.1 \times 0.2 \text{ m}$ の短形断面で 1 m の分離長を持つ立型風力分級機を用いて、外孔質ポリスチレン球を分離帯中央から供給して実験を行ない、得られた計算値と実験値の傾向が良く合うことを示した。しかし彼らのモデルでは粒子の慣性力を無視していること、粒子間相互作用を無視できる程の低粒子濃度で実験を行っていることなどのため、実際の分級機操作条件とは

図7 ポリスチレン球の分離曲線⁸⁾

図8 ポリスチレン球の分級機内平均滞留時間⁸⁾

定量的には大幅に異なると思われる。

Fan¹⁶⁾ は風力分級操作を非常に簡単化して原料の粒度分布を Gaudin 式

$$W_s = 100 d_s / 15 \quad \dots\dots(18)$$

で近似し、また軽成分の割合を浮沈分離実験から

$$W_L = \alpha W_s \quad \dots\dots(19)$$

の形で α を求め、粒子を垂直に空気を輸送する場合、Dalavalle の式

$$v = 10.7 \rho \cdot d_s^{0.57} / (\rho + 1) \quad \dots\dots(20)$$

と組み合わせて軽成分 W_L と風速 v との関係は

$$W_L \propto [(s+1)/s] v^{1.3} \quad \dots\dots(21)$$

で与えている。

立型分級機の中では Zig-Zag 型が通常使われているが、Worrell ら¹⁷⁾ は図9に示す3つのスロート形式について、紙、プラスチック、鉄、アルミからなる模擬ごみを使用して実験的に性能比較を行なった。分離効率 E を

$$E = R_L \cdot R_H \quad \dots\dots(22)$$

と定義して比較検討した。ここで R_L , R_H はそれぞれ軽成分、重成分の回収率である。図9に示す Utah スロートの分離効率は他と比較して v に敏感である。成分別に見ると紙はほとんど変わらないが、プラスチック、紙、アルミはスロート構造によって、分離特性が変わってくる

ZIGZAG THROAT UTAH THROAT DUKE THROAT

図9 実験に使用したスロート構造¹⁷⁾

図10 スロート構造の違いによる分離効率の変化¹⁷⁾

図11 各成分回収率¹⁷⁾

ことを示している。Vesilind ら¹⁸⁾ は 1.3 cm 角のプラスチックとアルミの混合物を使って Zig-Zag 分紙内での粒子濃度分布を測定すると共に、分離効率に及ぼす供給量の影響を調べた。供給量が増大するにつれて層内粒子濃度が増加すること、その結果粒子同士の干渉効果が増大し、分離効率が低下することを示唆した。

6. その他の分別技術

磁選は都市ごみ中の鉄製品分離に数多く採用されている。磁選機試験について Simister ら¹⁹⁾ の報告がある

表5 特定成分の精選別システム

回収物質	サブシステム名	工 程
パルプ	工業技術院 システム Pulp Sub	(原料) → 離 解 → 異物除去 → 脱 水 → 殺菌漂白 → 精 選 → 精製パルプ (パルパー) (篩・液体サイクロン) (スクリーン シッケーター) (殺菌 漂白塔) (篩 液体サイクロン パルプフィナーン)
ガラス	米国鉱山局 システム G.R.Sub	(残 査) → 有機物除去 → 脱 水 → 粉 砕 → 分 級 → 浮 選 → 磁 選 → 乾 燥 → ガラス (ジグ) (スバイラル分級機) (ロッドミル) (篩、スバイラル 分 級 機) (浮選機) (湿式磁選機) (回 転 乾燥機)
アルミ	米国鉱山局 システム Al-R-Sub	(原 料) → フィルム紙除去 → 静電分離 → アルミ (風力分級機) (静電分離機)

表6 ごみ特性化における精度と要因³⁵⁾

単位 操 作	量 予 測		組 成 予 測	
	精度 (+%)	単位	臨界成分	設計感度
受 入 れ 貯 槽	10—20	t/日	最 大 径	低
破 砕	10—20	t/単位時間	最大径, 易破砕物	中
ハ ン ド リ ン グ	10—20	〃	〃 〃	中
分 別	10	〃	全	中
分 級	10—20	〃	ガラス, 厨芥	中—低
磁 選	20—50	〃	金 属	中
熱 処 理	10—20	〃	有 機 物	中—高

が、それによると都市ごみの場合、複合材料であることから、回収率および純度の向上はあまり期待できない。特定な物質を対象とする選別技術には、非常に興味ある分離技術が開発されている。たとえば、低温破砕特性の差を利用した家電モーターから銅の回収技術、プラスチック種類別分別技術²⁰⁾、磁性流体を用いて金属混合物から浮沈分離により各金属を回収する技術²¹⁾、プラスチック静電特性の差を利用したプラスチック種類別分別技術²²⁾、溶剤可溶性の差を利用した分離技術²¹⁾、ガラス類²⁴⁾、³⁰⁾、プラスチック種類別分別へ浮選の適用²³⁾などがあり、また装置的にも永久磁石を傾斜板²⁴⁾またはトロンメル内²⁵⁾に貼って、誘導電流効果による導電性金属の分離など多種多様の試みがなされている。

7. 分別物の再利用

上述の粉砕、分別操作を組み合わせた分別システムについての実験報告は、たとえば Trezek²⁷⁾、De Cesare³⁰⁾、日本産業技術振興協会の報告書³⁸⁾などで発表されている。都市ごみ中の特定成分、紙³³⁾、アルミ^{28, 29)}、ガラス³⁴⁾回収などについて粗分別で得られる分別物から、さらに純度を高める精選別システムが構成されており、その代表的例を表5に示す。

ごみ中の有機成分は紙回収の他に燃料、または堆肥と

しての利用が目されており、燃料(RDF)として回収する分別システムについて Alter^{30, 32)}の総説、熱分解やメタン発酵による流体燃料化については、日本産業技術振興協会報告書などがある。次に回収した物質の品質市場など、利用面からの要請について Colon³¹⁾の総説、日本産業技術振興協会報告書³⁸⁾などがある。

8. おわりに

これらの単位操作を用いてシステムを構成するには、ごみの特性化が合理的なシステム合成を行なう上で重要である。Woodyard ら³⁵⁾はこの点の重要性を力説し、かつ設計上からごみの量と組成の精度に関する大まかな目安を表6のように与えている。しかしながら、これらの要因と数値は定量的なものとは言い難い。特に各単位操作をへる過程ではごみの成分の偏析と同時に混合も同時に進行しており、特にシステム性能比較検討または最適化を行なうとする場合は、ごみの性質を統一的に表わす変数、たとえば多成分混合度のようなものを導入する必要がある。一方、省エネルギーとシステム経済性に関する再利用システムの効率について Wilson⁴⁵⁾の解析があり、30の異なるシステムについて相互比較を行なっている。システム構成上、システム全体のエネルギー効率を最大とすることが大きな要因の一つであるため、各単

位操作での分離精度と必要エネルギーの関係等を明にすることも重要であろう。

最後に日本の実際のごみについて、実験データはたとえば通商産業省大型プロジェクト資源再生利用技術シス

テム研究開発計画などの中で大量に取得されているが、公開されているものが少なく、この点は非常に残念なことである。この分野での技術を進展させるため、積極的なデータの公開が望まれる。

文

献

- 1) Douglas, E., P.R. Birch: *Resource Rec. Conserv.*, 1, 319 (1976)
- 2) Kox, W.M.A., M.M.G. Sender: *ibid*, 8, 75 (1982)
- 3) Sender, M.M.G., M. Tels: *ibid*, 3, 129 (1978)
- 4) 都市廃棄物資源化システム研究会: “資源利用のためのごみ分別装置の開発に関する研究, 昭和50年度報告書” (1976)
- 5) Savage, G.M., L.F. Diaz, G.J. Trezek: *Resource Rec. Conserv.*, 5, 343 (1981)
- 6) Savage, G.M., G.R. Shifflett: “Processing Equipment for Resource Recovery Systems III” US PB Rep 81-151557 (1980)
- 7) Ito, K., Y. Hirayama: *Resource Recov. Conserv.*, 1, 45 (1975)
- 8) Obeng, D.M., G.J. Trezek: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.* 14, 113 (1975)
- 9) Callcott, T.G.: *J. Inst. Fuel.*, 33, 529 (1960)
- 10) Shifflett, G.R., G.J. Trezek: *Resource Rec. Conserv.*, 4, 31 (1979)
- 11) Bernheisel, J.F., P.M. Bagalman, W.S. Parker: “Proc. 6th Mineral Waste Utilization Symp.” 255 (1978)
- 12) Warren, J.L.: *Resource Rec. Conserv.*, 3, 97 (1978)
- 13) Alter, H., J. Gavis, M.L. Renard: *ibid*, 6, 223 (1981)
- 14) 武富, 岡田, 富沢, 松田: 三菱重工技報, 12, 180 (1975)
- 15) Rumps, Jr. P.P.: *Resource Rec. Conserv.*, 2, 237 (1976/1977)
- 16) Fan, D.N.: *ibid*, 1, 141 (1975)
- 17) Worrell, W.: *ibid*, 4, 247 (1979)
- 18) Visilind, P.A., R.A. Henrikson: *ibid*, 6, 211 (1981)
- 19) Simister, B.W., D. Bendersky: “Processing Equip. for Resource Rec. Systems II” US PB Rep. 81-141590 (1980)
- 20) 日本産業技術振興協会 “資源再生利用技術システム開発委員会, 昭和49年度報告書” (1975)
- 21) 日本産業技術振興協会 “資源再生利用技術システム開発委員会, 昭和50年度報告書” (1976)
- 22) Pearse M.J., T.J. Hickey: *Resource Rec. Conserv.*, 3, 179 (1978)
- 23) Saitoh, K., I. Nagano, S. Izumi: *ibid*, 2, 127 (1976)
- 24) Spencer, D.B., E. Schloman: *ibid*, 1, 151 (1975)
- 25) Schlöeman, E.: *ibid*, 2, 147 (1976)
- 26) 発明協会: “資源再生利用技術システムに関する 特許調査研究” (1982)
- 27) Trezek, G.J., G. Savage: *Resource Rec. Conserv.*, 2, 67 (1976)
- 28) Dean, K.C., E.G. Valdez, J.H. Bilbsey Jr.: *ibid*, 1, 55 (1975)
- 29) Bourcier, G.F., K.H. Dale: *ibid*, 3, 1 (1978)
- 30) Alter, H.: *ibid*, 5, 73 (1980)
- 31) Colon, F.J., B. Boesmans: *ibid*, 5, 85 (1980)
- 32) Alter, H., J. Arnold: “Proc. 6th Mineral Waste Utili. Symp.”, 172 (1978)
- 33) Savage, G.M., L.F. Diaz, G.J. Trezek: *ibid*, 223 (1978)
- 34) Heginbotham, J.H.: *ibid*, 231 (1978)
- 35) Woodyard, J.P., A.J. Klee: *ibid*, 273 (1978)
- 36) De Cesare, R.S., F.J. Palumb, P.M. Sullivan: US PB Rep 81-148132 (1982)
- 37) 日本産業技術振興協会: “資源再生利用技術システム開発委員会報告” (1973), (1974)
- 38) 日本産業技術振興協会: “資源再生利用技術システムの評価研究報告書” (1977), (1978), (1979), (1980), (1981), (1982)
- 39) Dener, V.R., R. McChesney: “Proc. 4th Mineral Waste Utilization Symp.” 63 (1974)
- 40) Douglas, E., C.S. Powder, T. Walsh: Proc. Symp Inter. Solid Waste Disposal Montreal (1974)
- 41) Bridgwater, A.V.: *Resource Rec. Conserv.* 5, 51 (1980)
- 42) Wiley, J.S.: *Compost Sci.*, 4, 7 (1963)
- 43) Lin, H.: US Patent 4, 204, 904
- 44) Maker, H.V., E.L. Gresh: “Proc. 6th Mineral Waste Utili. Symp.” 196 (1978)
- 45) Wilson, D.C.: *Resource Rec. Conserv.*, 4, 161 (1979)