水環境学会誌　Journal of Japan Society on Water Environment　Vol.28, No.9, pp.589-594 (2005)
〈技術報告—Technical Report〉

MRP土壌洗浄プロセスにおける汚染物質の分離

毛利　光男*　　赤木　寛一**

Separation of Contaminated Fine Particles in MRP Soil Washing

Mitsuo MOURI* and Hirokazu AKAGI**

* Soil Remediation Division, Engineering Headquarters, SHIMIZU Corporation, 1-2-3 Shibaura, Minato-ku, Tokyo 105-8007, Japan
* * Department of Civil & Environmental Engineering, WASEDA University, 3-4-1 Ohkubo, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan

Abstract

MRP soil washing is physical-chemical separation based on mining and mineral processing principles for removing a broad range of organic and inorganic contaminants from soil. Generally, contaminants reside and are concentrated in a fine fraction. Grain-size distributions and load curves (contaminant distributions) of feed soil are studied to understand and characterize the soil particle/contaminant relationship. A small amount of contaminated fine particles is separated to the underflow (sand fraction) due to the misplacement of a hydrocyclone. Flotation is very useful for removing contaminated fine particles that remain in the cyclone underflow. In a flotation unit, contaminated particles are selectively made hydrophobic by modifying their surface properties with selective reagents. The hydrophobic particles attach to air bubbles and are carried to a froth layer. The separation of these contaminated particles is achieved by removing the froth layer. The separation of contaminated soil particles is investigated in a large-scale plant to understand the performance and validity of the hydrocyclone and flotation unit. A mathematical model that considers both the contaminant concentration ratio of the froth layer and the amount of froth is introduced and used in evaluating the removal efficiency of flotation.

Key words: soil washing, particle-size distribution, fine particle separation, hydrocyclone, flotation

1．はじめに

土壌洗浄法は汚染物質の多くが砂分や粗粒子よりも細粒子分（粘土，シルト分）に付着しやすいという性質を利用して，汚染土壌から細粒子分を分離，除去することによって土壌を浄化する技術である[1)]。オランダA&G社から技術導入した土壌洗浄プラント(Mobile Remediation Plant(MRP))は，湿式フルイ，液体サイクロン，フローテーション，スパイラルの分級・洗浄プロセスによって，重金属類や油の汚染物質を，細粒子分を主体とした濃縮汚染土に分離，濃縮する[2)]。これによって，場外処分の対象量が汚染土壌全量(100%)から濃縮汚染土（細粒子分）の量(10～30%)へ大幅に減量できるため，低コストの土壌処理が可能となる。2002年に首都圏からの汚染土壌を受け入れるのに便利な神奈川県川崎市に土壌洗浄プラント事業所を設立し，同年9月から本格的な土壌洗浄事業を開始した。川崎では本洗浄プラントを汚染土壌の洗浄処理工場（固定式）として使用している。2005年3月までに土壌洗浄処理を実施した累計処理ton数は約270,000tonであり，2003年度から現在まで月10,000tonのペースで汚染土壌の受け入れと洗浄処理を行っている。

汚染土壌においては汚染物質の種類，存在形態は様々であるが，汚染物質が細粒子分側へ偏って存在している場合が多い。汚染物質が細粒子分側へ偏って存在している場合は，液体サイクロンを用いて細粒子分を分離することにより汚染物質を効率的に除去することが可能である。但し，液体サイクロンによる分級は，アンダーフロー及びオーバーフローへの誤入（misplacement）を伴うため，アンダーフローには砂分だけではなく誤入による細粒子分が含まれる。細粒子分の多くには汚染物質が付着しているため，高品質の洗浄土を得るためには，アンダーフローに含まれる汚染物質をフローテーション等の後工程で効率良く分離･除去する必要がある。

本研究では，汚染物質と密接な関係がある細粒子分が，MRP土壌洗浄システムにおいてどのように分離･除去されているのかを把握することを目的に，各洗浄プロセスでのサンプリングに基づく実態調査とモデル解析を行った。特にフローテーションにおいては，スクレーパーによってかき取られるフロスの粒度分布からフローテーションプロセスが分離可能な細粒子分の粒子径範囲を検討した。フロスとして分離される固形分の割合と汚染物質のフロスへの濃縮率とをパラメータとして，フローテー

*　清水建設株式会社エンジニアリング事業本部土壌環境本部　〒105-8007　東京都港区芝浦1-2-3　シーバンスS館
* *　早稲田大学理工学部社会環境工学科　〒169-8555　東京都新宿区大久保3-4-1-58号館205室

ションプロセスにおける洗浄効率の検討も行った。

2．土壌洗浄プロセス

MRP土壌洗浄プラントによる汚染土壌の基本的な処理フローを**Fig.1**に示す[3]。土壌洗浄プラントの設置面積は約400m^2，高さは11.4mである。汚染土壌の処理能力は，35～40ton/hrである。現在は月10,000tonのペースで汚染土壌の受け入れと洗浄処理を行っている。土壌洗浄プラント事業所へ運ばれた汚染土壌は，ストックヤードに仮置きされる。汚染土壌は重機によってストックヤードから受け入れバンカーへ順次投入される。受け入れバンカーに投入された汚染土壌は，湿式フルイにより2mm以上の礫・粗砂を取り除いた後，2段の液体サイクロン（50%分級径(D_{50})の大きなC1と小さなC3の2つのサイクロンを使用）によって細粒子分と砂・細砂分に分離される。一般的に汚染物質はその多くが細粒子分に付着・吸着しているため，細粒子分を分級することによって，砂・細砂分から汚染物質を効率良く分離，除去することができる。砂・細砂分は，スクラバーにおいて洗浄薬剤とよく混合された後，フローテーションに入る。ここで土壌中の汚染物質は，清浄な土壌粒子との表面性状の違いを最大限利用して洗浄・分離される。フローテーションで洗浄された砂・細砂分は，スパイラルと脱水サイクロンを経て洗浄処理土となる。汚染物質が濃縮されている濃縮汚染土は脱水ケーキとして外部処分場へ搬出される。

以下にMRP土壌洗浄の主要な分離プロセスである液体サイクロンとフローテーションの概要を記す。

2.1　液体サイクロン

液体サイクロンは，液体中に懸濁している粒子をスラリー状のままサイクロン内に圧入し，旋回運動による遠心作用によって，液体と固体粒子を分離または濃縮する装置である。**Fig.2(a)**に示すように液体サイクロンに流入したスラリーは内部で分級され，上部流出口より細粒子分を主体とするオーバーフローが流出，下部流出口より砂分を主体とするアンダーフローが流出する。ハイドロサイクロンの分級効率は，粒径D_pなる粒子がどれだけアンダーフロー側へ出てくるかを投入土壌に対する割合で示す分級効率曲線で表される。**Fig.2(b)**に分級効率$\Delta\eta(D_p)$のハイドロサイクロンが粒度分布$f(D_p)$ のフィードを分級する場合の模式図を示す[4]。アンダーフロー（斜線部）には砂分だけではなく誤入（misplacement）による細粒子分も含まれることがわかる。

2.2　フローテーション

フローテーションでは汚染物質と清浄な土壌粒子との表面性状の違いを利用して汚染物質を分離する。汚染物質に適した捕収剤（collector）を適正なpH下で添加することによって汚染土壌の粒子表面を疎水性にすることが可能である[5]。捕収剤としては，ザンセート，ジアルキルジチオリン酸塩，アルキル硫酸塩，アルキルスルホン酸塩，脂肪酸塩などが用いられている[5]。汚染物質（重金属）の表面電荷は，溶液のpHによって変化する。表面電荷が0となるpHの値（Point of Zero Charge）は，物質（重金属，シリカなど）によって異なる[6]。汚染物質と清浄な土壌粒子の表面電荷が正と負に分かれるpH領域において，捕収剤を汚染物質の表面に付着させると汚染土壌粒子は疎水

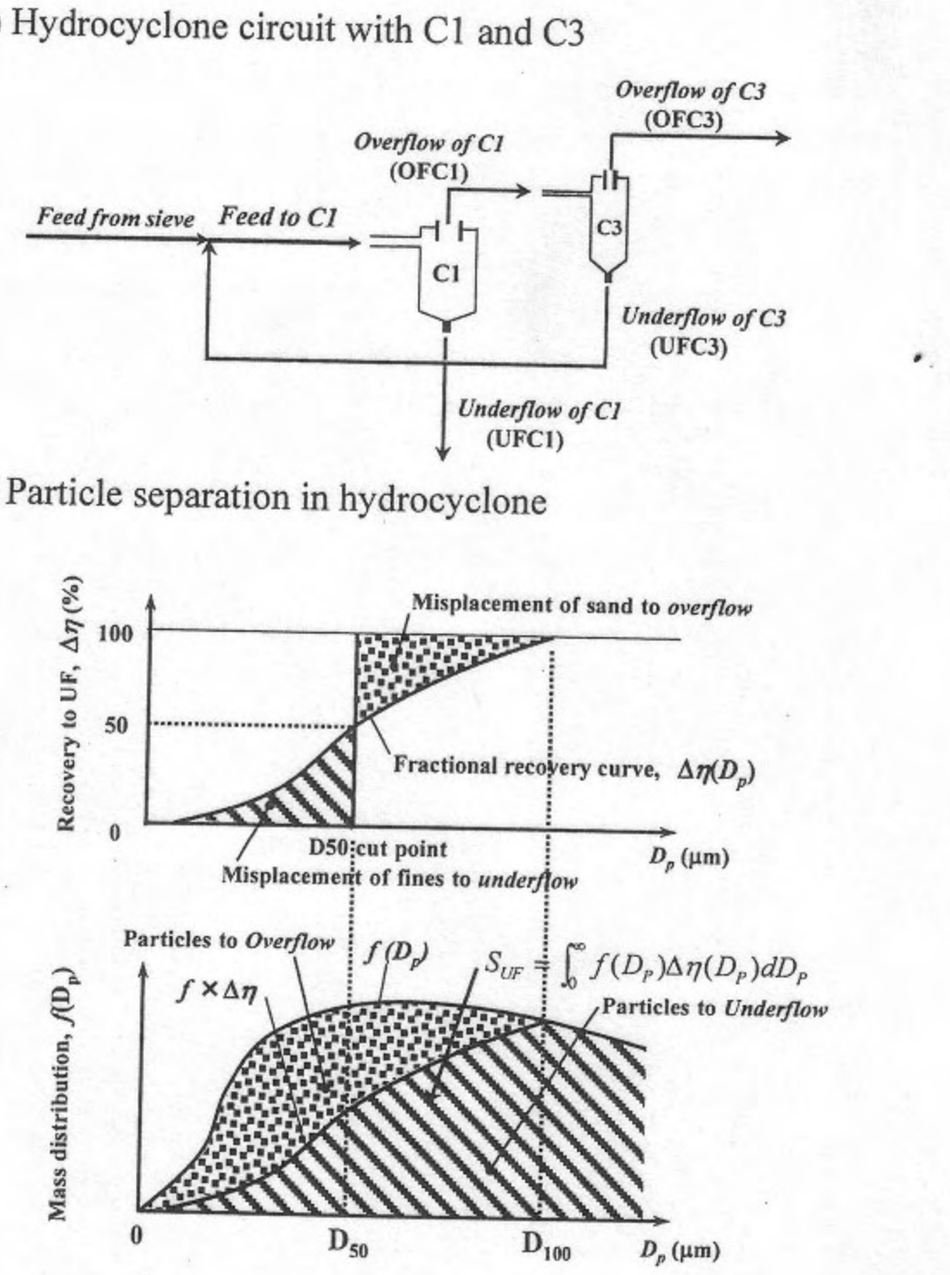


Fig. 2　Schematic of hydrocyclone circuit and particle separation[4]

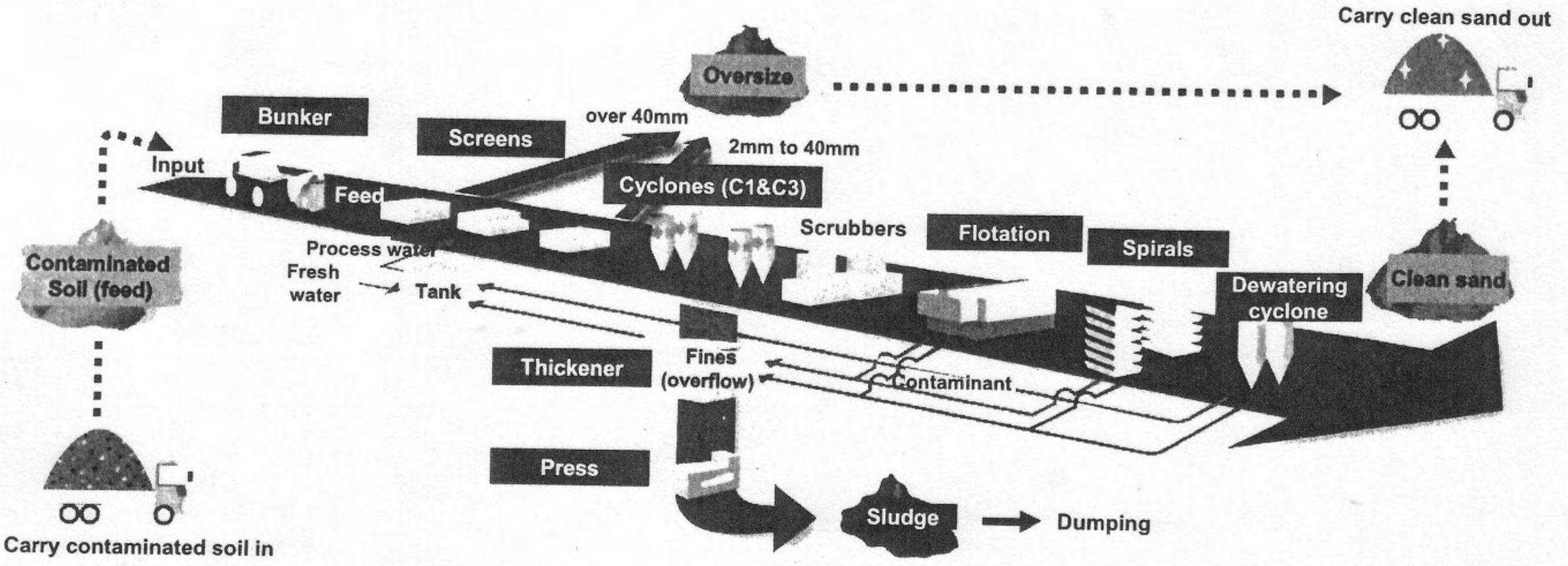


Fig. 1　Soil washing plant flowsheet[3]

性になって気泡へ付着することができる[4]。**Fig.3(a)**に分離・除去の概念図を，**Fig.3(b)**にフローテーションセルの概要を示す。**Fig.3(b)**に示すように汚染物質を含む土壌スラリーがフローテーションセルに流入する[7]。ローターの回転で生じた負圧によって回転軸中空部を通してセル内に空気が導入され，ローター底部から気泡(air bubble)が発生する。汚染物質（油，重金属類）はこの気泡に付着し，気泡とともにセル上部へ上昇しフロス(froth)を形成する。汚染物質が付着しているフロスはスクレーパーによってかき取られる。汚染物質が除去された洗浄土はセル底部から排出される。

Fig.4に示すようにフローテーションの性能は，回収量（recovery）と品位（grade）の両面で評価される[5]。フローテーション時間と回収量の関係は時間と共に回収量が増加する右上がりの曲線（recovery-time curve）で示され，品質と回収量の関係は，高品位になるほど回収量が減少する右下がりの曲線（recovery-grade curve）で示される[5]。土壌洗浄におけるフローテーションは，汚染物質を除去することであり，有価金属を回収濃縮することを目的とする鉱山のフローテーションとは目的が異なる。

本プラントでは，1槽の容積が約2.8m^{3}のフローテーションセルが6槽連結されている。土壌スラリーのフローテーションにおける全滞留時間は10～20分，各セルの送気量は3～5m^3·hr^{-1}程度であるが，これらの運転条件は汚染土壌の種類と処理量によってプロジェクト毎に変更される。

3．粒度分布とロードカーブ

土壌洗浄においては，汚染土壌の粒度分布と汚染物質のロードカーブ（Load curve，負荷曲線）を的確に把握することが非常に重要である。汚染土壌の粒度分布は，汚染サイトによって様々である。工場地域では，埋め立てや客土などの行為によって同じ敷地内であっても土壌の粒度分布が異なる場合が少なくない[4]。

土壌における重金属保持のメカニズムは複雑である。重金属は酸化物，水酸化物，炭酸塩，交換性陽イオン，有機物との結合等の状態で，局部的な環境及び土の溶液中の成分に依存して保持される[8]。また，土壌の重金属は，土壌粒子の組成や重金属化合物の種類によって保持量や存在形態が異なることも知られている[9]。

このため，実務的には土壌試料の篩い分けを行い，汚染物質が土壌粒子径に対してどのように分布しているかを示すロードカーブを求める。土壌試料の篩い分けは，篩い目が38，63，125，250，500，1000，2000，4000μmの金網篩いを用いて湿式の条件で行った。篩い目がD_L とD_U の金網篩いによって分級された土壌粒子の代表粒子径D_M は次式より求めた。

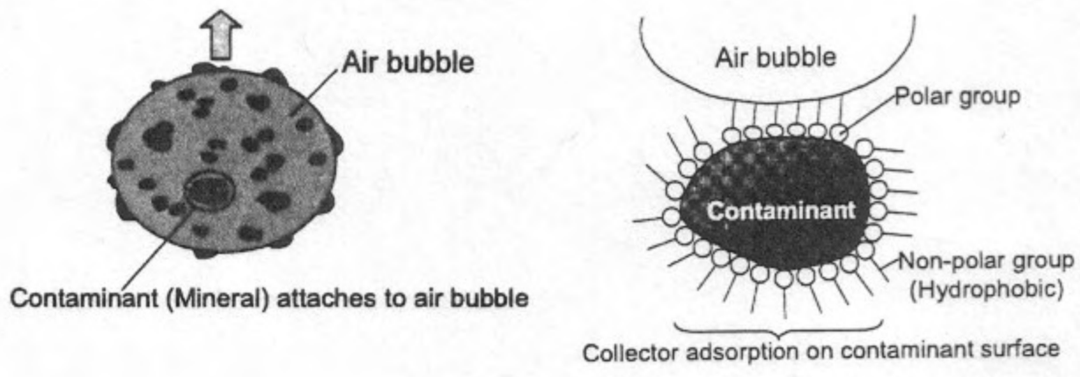
$$D_M = \sqrt{\left(D_L^{\,2} + D_U^{\,2}\right)/2}$$

ここで，D_M ：代表粒子径，D_L ，D_U ：金網篩いの篩い目で $D_L < D_U$ である。例えば，38μm未満の土壌粒子の代表径は，D_L = 0μm，D_U =38μmよりD_M = 26.8μm となる。**Fig.5**に汚染土壌のロードカーブ（38μm以下の土壌中の汚染物質含有量を100％として表示）の一例を示す。汚染土壌試料は首都圏各地の汚染サイトから運ばれてきたものである。一般に鉱物油や重金属の汚染物質は細粒子分（粘土，シルト分）に保持されることが多いが，**Fig.5**でも同様の傾向が認められる。鉛（Pb）の場合は，2000μm以上の土壌粒子も高い含有量値を示しているが，鉛の鉱滓が混ざっていたためである。

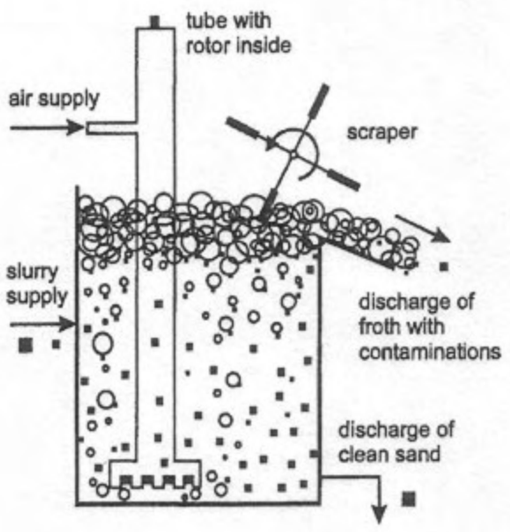
土壌洗浄においてどの粒子径範囲を分離·除去し，またどの粒子径範囲を洗浄砂として回収するかについては，汚染土壌の粒度分布とロードカーブの両方から判断する必要がある。分離除去する粒子径の範囲を決定する際には，**Fig.6**に示すような土壌粒子径と汚染物質総量の関係を示す分布曲線が必要である。以下に汚染物質総量の分布曲線を作成する方法とその意味を記す。液体サイクロンへ投入される2mm以下の土壌の粒度分布を**Fig.6(a)**に示す。汚染物質の分布については**Fig.6(b)**のように汚染物質が細粒子分に偏在している分布(A）から均一な分布(E）までの5段階のロードカーブを考える。分布-A，分布-Bは**Fig.5**に示した潤滑油，鉱物油，水銀のように細粒子分側に負荷が偏在しているロードカーブに対応する。

各画分の汚染物質総量の割合は，その画分に存在する土壌粒子の存在割合と汚染物質の存在割合（ロードカーブ）の積をこれらの積の総和で割ることによって求めることができる。これらを累積することによって，汚染物質総量の累積分布曲線が得られる。5段階のロードカーブに対応する汚染物質総量の累積分布曲線-A～Eを**Fig.6(c)**に示す。

(a) Principle of froth flotation



(b) Flotation cell [7]



The surfaces of selected minerals are made hydrophobic by conditioning with selective reagents. The hydrophobic particles attached to air bubbles are carried to a froth layer above the slurry.

Fig. 3 Schematic of flotation and contaminant separation

(a) recovery-time (b) recovery-grade

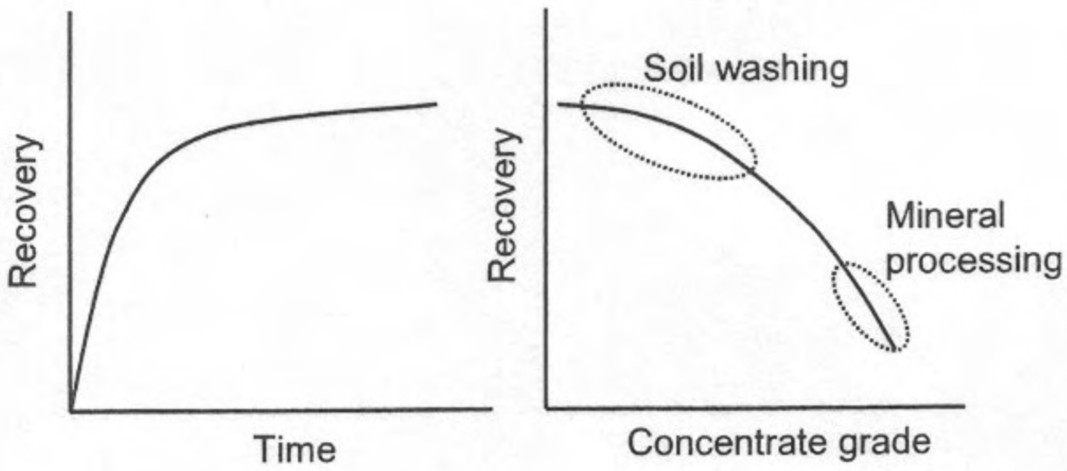


Fig. 4 Recovery-time and recovery-grade curves

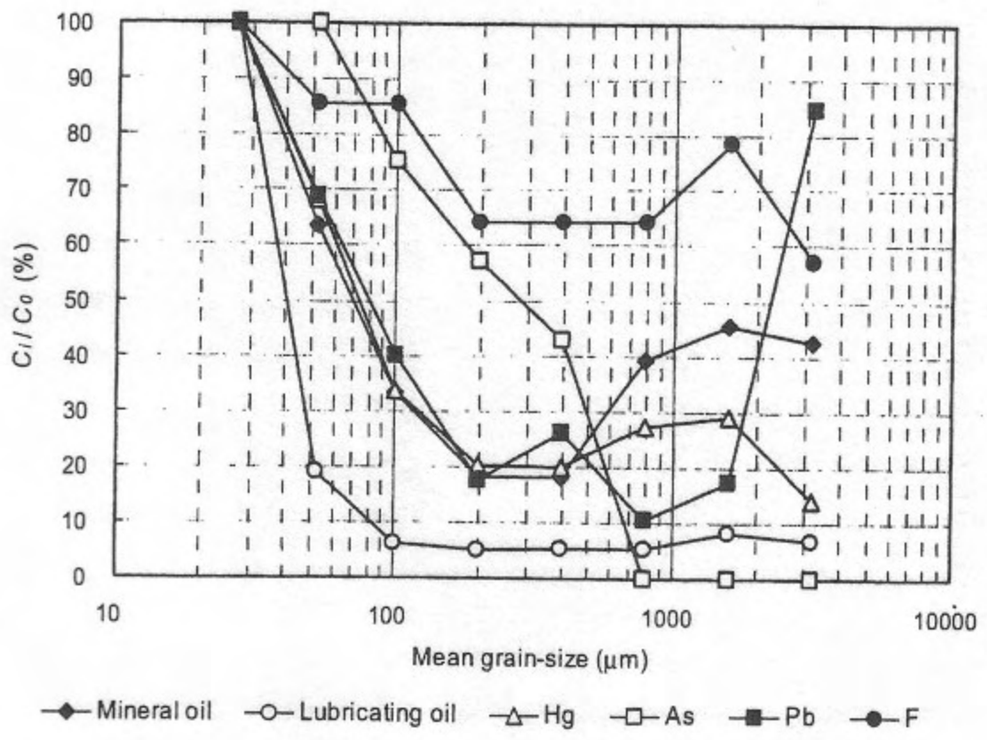


Fig. 5 Example of load curves of contaminated soil

C_i : Contaminant content in the fraction-i

C_0 : Contaminant content in the fraction smaller than 38μm

Fig.6(c)より，汚染物質が細粒子分に強く偏在していると，すなわち細粒子分を分離することが汚染物質の除去に大きく寄与することがわかる。この事例では60μm未満の細粒子分を分離すると，分布曲線-Aの場合は汚染物質の87%，分布曲線-Bの場合は73%が除去される。当然の事ながら，汚染物質の偏りが小さくなるほど細粒子分の分離によって除去される汚染物質の割合は相対的に低下する。

4．汚染物質の分離

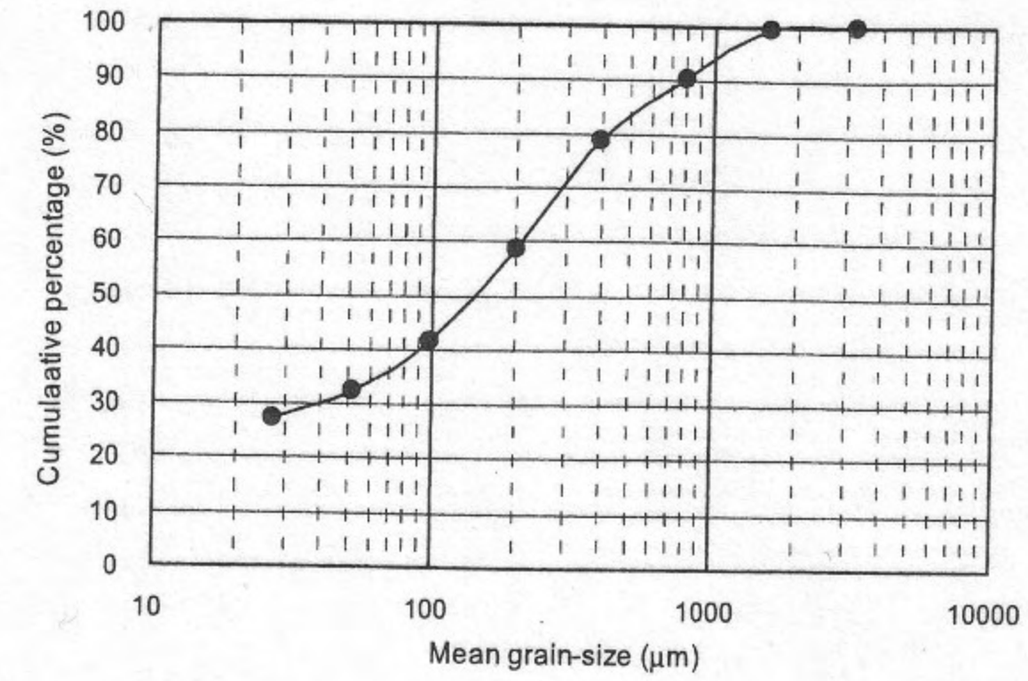
4.1 液体サイクロン

湿式フルイによって2mm以上の礫・粗砂分を取り除かれた汚染土壌は，**Fig.2(a)**に示す2段の液体サイクロン（C1，C3）によって細粒子分（C3のオーバーフロー（OFC3））と砂・細砂分（C1のアンダーフロー（UFC1））に分級される。**Fig.7**に，液体サイクロンに流入するフィード，及びC1とC3によって分級されたUFC1とOFC3の粒度分布の一例を示す。UFC1には砂分だけでなく誤入による細粒子分が含まれていること，OFC3はそのほとんどが細粒子分であることが認められる。**Fig.6**で説明したように汚染物質の多くを含む細粒子分をOFC3として分離することは，汚染物質の分離·除去において非常に効果的である。

4.2 フローテーション

4.2.1 分離される粒子径範囲

液体サイクロンで分級された砂・細砂分（UFC1）に残存している汚染物質はフローテーションプロセスで分離除去される。砂・細砂分はスクラバーで薬剤と混合された後，フローテーションの第1槽に流入する。第1槽から第6槽まで順に洗浄された砂·細砂分は第6槽よりスパイラル槽へ流出される。フローテーションにおいては，捕収剤によって表面が疎水性になった汚染土壌粒子は気泡へ付着し，上部へ連行されフロスを形成する。フローテーションの性能は，汚染物質の種類と形態，捕収剤の種類と注入率，pH，空気量など多くの要因の影響を受けるため，事前検討試験を行ってこれらの条件を選定する。フローテーションによって分離される粒子径範囲を把握するため，フローテーションセルに流入する砂·細砂分（UFC1）とスクレーパーによってかき取られた直後のフロスを現場において採取し，それぞれの粒度分布を調べた。フロスの採取は土壌スラリーの流入·流出による影響を受けにくい第2槽



C_i : Contaminant content in the fraction-i

C_0 : Contaminant content in the fraction smaller than 38μm

Fig. 6 Grain size distributions, load curve patterns, and total contaminant distributions of feed soil

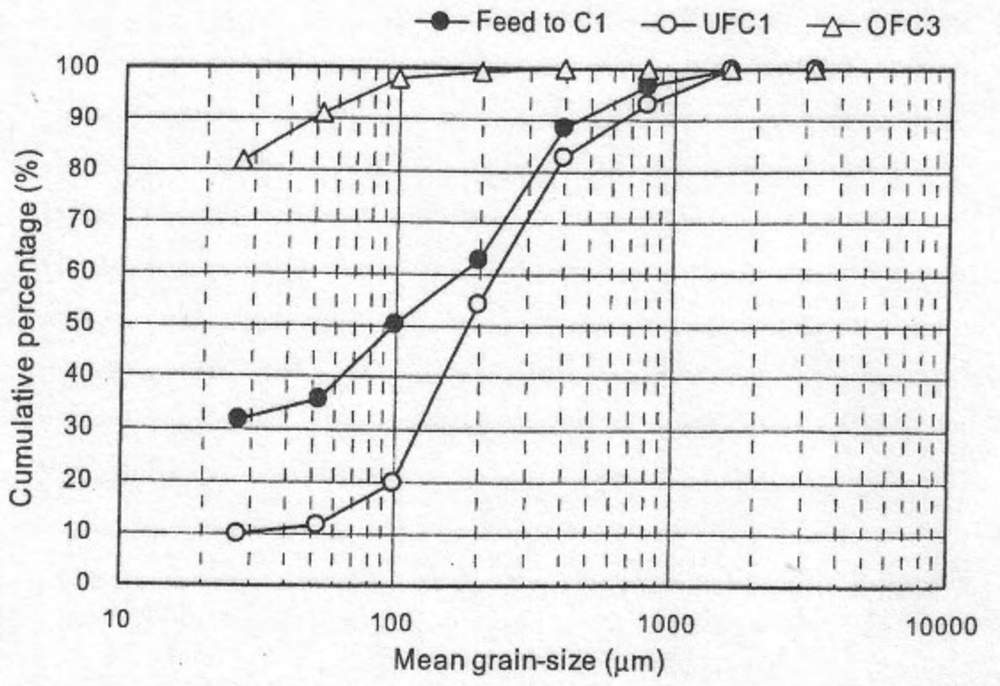
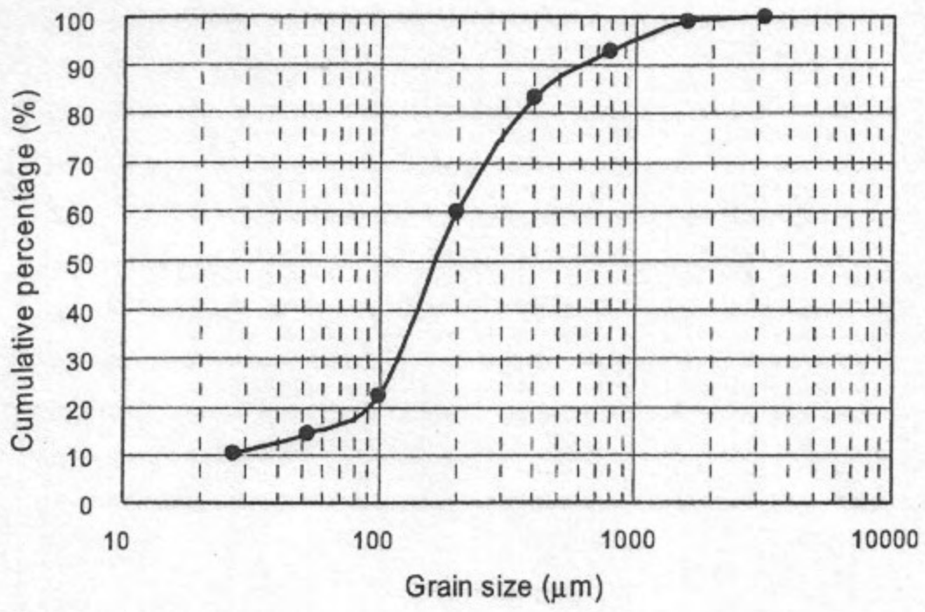


Fig. 7 Example of grain-size distributions of feed to C1, UFC1, and OFC3

(a) Grain-size distribution of UFC1



(b) Particle-size distributions of froth sample

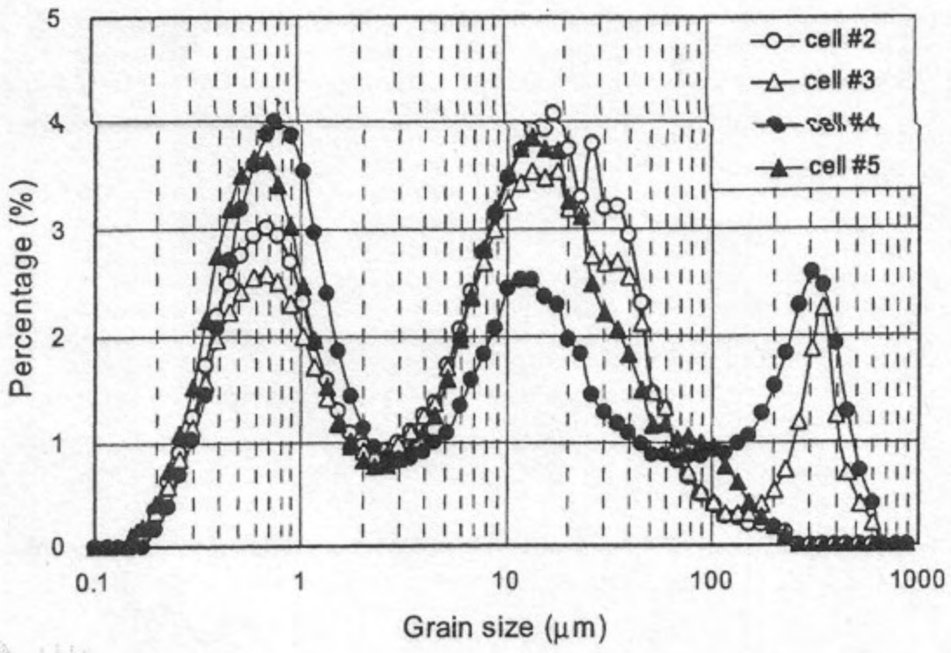
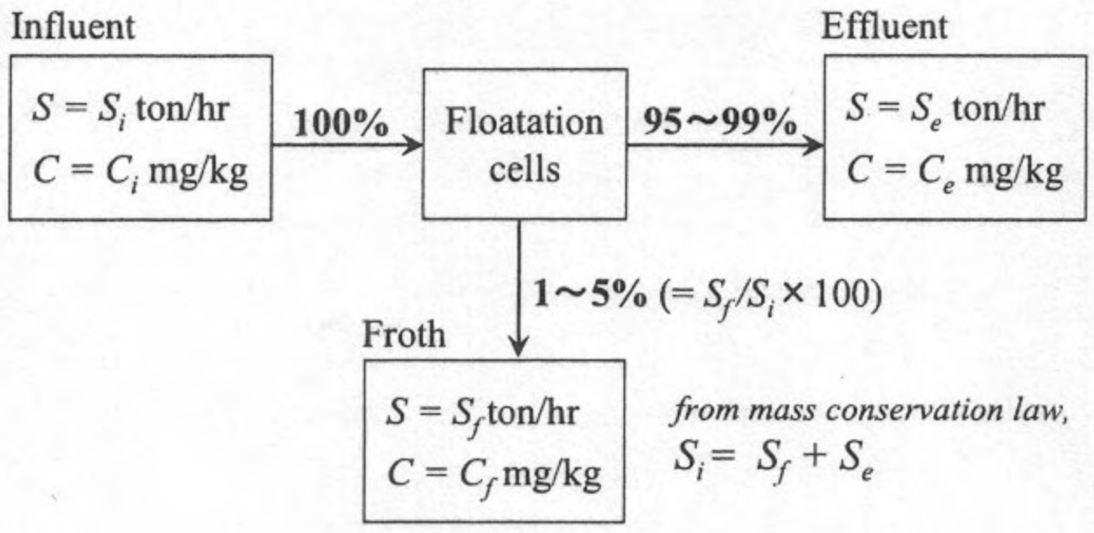


Fig. 8 Particle-size distributions of UFC1 as influent to flotation, and fine particles removed to froth

(a) Mass flow concerned with the flotation process



(b) Relationship among C_f/C_i, S_f/S_i, and the removal efficiency

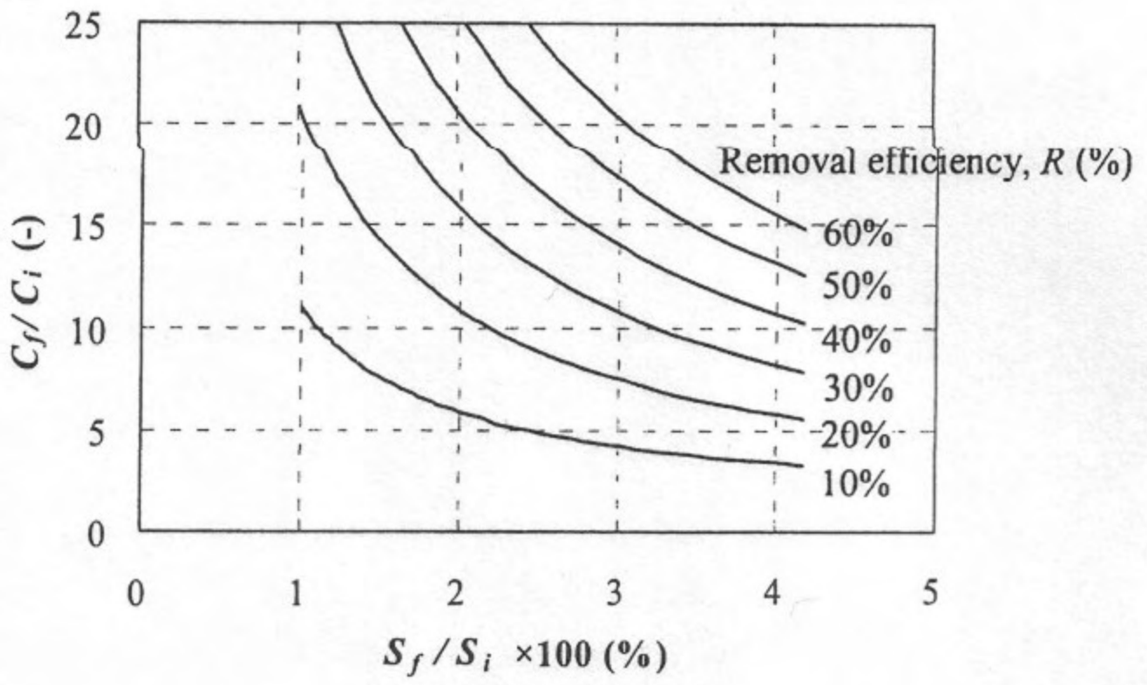


Fig. 9 Relationship among the contaminant concentration in froth, the amount of froth, and the removal efficiency in floatation

(cell #2) から第5槽 (cell #5) において行った。現場サンプリングを行ったときの汚染物質は鉱物油と鉛であり，捕収剤は脂肪酸系の薬剤が使用されていた。フロスに付着していた細粒子分の粒度分布は，レーザー解析／散乱式粒度分布測定装置LA-910(堀場製作所㈱製)を用いて測定した。

フローテーションセルに流入する砂･細砂分 (UFC1) の累積粒度分布を**Fig.8(a)**に，フロスに含まれる細粒子分の粒度分布を**Fig.8(b)**に示す。**Fig.8(a)**のUFC1には，60μm未満の細粒子分が約15%含まれていることがわかる。

Fig.8(b)よりフロスに含まれる細粒子分の粒度分布は，第3槽と第4槽については2μmから約600μmまでの分布であること、第2槽と第5槽については2μmから約200μmまでの分布であることが認められる。10～20μm未満の微細粒子は，サイクロンの誤入によるものと，スクラバーでの撹拌時に砂･細砂分の摩擦によって生じる粉末の両方が含まれていると考えられる。この10～20μm未満の微細粒子のフローテーションについては，物理的な接着，及び化学的な付着の両面から議論されている[5,10]。今回のデータでは，**Fig.8(b)**に示すように2～3μmにおいて粒度分布曲線が凹になっていた。粒子と気泡の物理的な接着を考える立場からは，粒子がある限界粒子径よりも小さくなると粒子は気泡周囲の流線に沿って流されてしまい気泡に付着できないこと，この限界粒子径は気泡の径の平方根に逆比例し，例えば2mmの気泡に対しては20μm程度であることが述べられている。化学的な立場では微細粒子を含む試料を対象にフローテーションを行うと，微細粒子が目的鉱物の表面において付着凝集を起こすため，回収されたフロスには目的鉱物以外の粒子も含まれることが知られている。また，粘土粒子のように結晶格子における1つのイオンの置換や表面欠陥によって粒子端において負の固定電荷を生じる粒子に対しては，目的鉱物の有無によって選択的に分離，回収することが難しい。

さらに，粒子径が小さく気泡への接着が困難とされる微細粒子は沈降速度が小さいためフローテーションセル上部のフロス層の液相部に取り込まれやすいことが考えられる。この場合も，フロス液相部に含まれる微細粒子はフロスと共に回収される。目的鉱物の品位 (grade) を重視する鉱山の立場からは，10～20μm未満の微細粒子が非選択的に回収されることは好ましくない。しかし，土壌洗浄においては非選択的であっても汚染物質が偏在している微細粒子をフローテーションで分離することは汚染物質を除去する上で効果的であると判断される。

4.2.2 洗浄効果

前述の通り，土壌洗浄におけるフローテーションは，有価金属を回収濃縮することを目的とする鉱山のフローテーションと異なり，UFC1に残っている汚染物質を除去し高品質の洗浄土を得ることを目的とする。このため，以下の事柄に留意する必要がある。

- 高い除去効率を得ること
- 残渣となるフロスの量をできるだけ少なくすること
- 洗浄処理量をできるだけ大きくすること

実務的には，上記の相反する3つの要素をバランスさせることが重要となる。このため，フロスとして排出される固形物の割合と汚染物質のフロスへの濃縮率をパラメータとして，フローテーションプロセスの除去効率の解析を行った。

フローテーションプロセスにおける土壌粒子の流れを**Fig.9(a)**に示す。本プラントではフローテーションセルに流入する土壌固形分量の1%～5%がフロスとして排出される。この比率は，フローテーションセル内の滞留時間と土壌中の細粒子分の割合によって左右される。**Fig.9(a)**よりフローテーションプロセスの汚染物質の収支は次式の関係で記される。

$$S_i \times C_i = S_e \times C_e + S_f \times C_f \qquad (1)$$

ここで，$r = C_e / C_i$とおくと，フローテーションにおける汚染物質の除去率は R は，$R(\%) = (1\text{-}r) \times 100$ で求められる。また土壌固形物量の収支より，$S_i = S_f + S_e$ である。

(1)式に$r = C_e / C_i$ を代入してC_f / C_i 及びS_f / S_iで整理すると次の（2）式が得られる。

$$C_f / C_i = (1-r)/(S_f / S_i) + r \qquad (2)$$

(2)式よりフロスとなる固形分の割合 $S_f / S_i \times 100$(-)，汚染物質の濃縮率 C_f / C_i(-)，フローテーションでの汚染物質除去率R (%)の関係を**Fig.9(b)**に示す。

Fig.9(b)より汚染物質の除去率を高くするためには，汚染物質の濃縮率を上げること，もしくはフロスとして排出される固形物の割合を増やすことが必要であることがわかる。濃縮率とフロスとなる固形分の割合の関係は，**Fig.9(b)**に示すように右下がりの関係にあり，汚染物質の濃縮率が高い場合は，残渣となるフロスの排出量を低く抑えることができる。

液体サイクロン及びフローテーションで分離･除去された細粒子分は，凝集沈殿と脱水工程を経て濃縮スラッジとして場外処分される。この場外処分費用はスラッジ重量に比例する。土壌洗浄プロセス全体の経済性の観点から，効率のよい凝集沈殿条件とできるだけ低い含水率の脱水スラッジが得られる運転条件について実験的検討を進めている[11]。

5．まとめ

本研究では，土壌洗浄において汚染物質と密接な関係のある細粒子分が各プロセスでどのように分離･除去されているのかを把握するため，現場調査を実施した。

さらに，フローテーションプロセスにおける洗浄効率のモデル解析を行い，汚染物質の濃縮率とフロスとなる固形分の割合との関係を求めた。得られた結果を以下に要約する。

1）汚染土壌の粒度分布とロードカーブを合成することによって，汚染物質総量の累積分布曲線を求めることができる。この累積分布曲線によって，液体サイクロンの50%分級径や洗浄砂として回収する粒子径範囲を決定することができる。

2）液体サイクロンのアンダーフロー（UFC1）には，砂分だけではなく，誤入（misplacement）による細粒子分が含まれる。汚染物質と関連の深い細粒子分をフローテーションで分離することは汚染物質を除去する上で効果的である。

3）フローテーションにおいてフロスに含まれる細粒子分の粒度分布は2μm～600μmもしくは2μm～200μmであった。フローテーションプロセスにおいて，汚染物質を多く含む微細な粒子分を砂分から分離することは，汚染物質を除去する上で効果的である。

4）フローテーションにおける汚染物質の除去率を高くするためには，汚染物質の濃縮率を上げること，もしくはフロスとして排出される固形物の割合を増やすことが必要である。

謝　辞

本研究の実施と論文作成に当っては，清水建設株式会社エンジニアリング事業本部土壌環境本部の礒直子氏，田中仁志氏，羽田義治氏，菅原尚也氏，及び早稲田大学理工学部社会環境工学科の石田聖一氏から多大な協力を頂きました。液体サイクロン及びフローテーションの実験と解析に当ってはA&G Milieutechniek 社のMarc Pruijn氏，Koen A. van Olst氏，及び株式会社環境建設エンジニアリングの熊本進誠氏から有益な助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

（原稿受付　2005年 2月 7日）
（原稿受理　2005年 7月 8日）

参　考　文　献

1) EPA (2001) A Citizen's Guide to Soil Washing, 542-F-01-008.
2) 田中仁志，毛利光男，熊本進誠，羽田義治，今沢正樹 (2003) 高効率土壌洗浄プラント(MRP)による土壌浄化，土壌環境センター・技術ニュース，**7**, 36-38.
3) 毛利光男 (2004) 土壌洗浄による汚染土壌の浄化処理，分離技術，**34**, 6, 384-389.
4) 毛利光男，田中仁志，赤木寛一 (2004) 土壌洗浄における液体サイクロン系統のモデル化，水環境学会誌, **27**, 8, 535-540.
5) Wills, B. A. (1979) Chapter 12: Froth Flotation, Mineral processing technology, pp. 258-341, Butterworth-Heinemann, Oxford.
6) Kosmulski, M. (2002) The pH-dependent surface changing and the points of Zero charge, *Journal of Colloid and Interface Science*, **253**, 1, 77-87.
7) 熊本進誠，千色いづみ，田崎雅晴，田中仁志，毛利光男 (2003) 土壌洗浄法におけるフローテーション法の検討，地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会（第9回），326-327.
8) Yong, R. N., Mohamed, A. M. O., and Warkentin, B. P. (1995) Principles of Contaminant Transport in Soil（邦訳：地盤と地下水汚染の原理，福江正治，加藤義久，小松田精吉訳），pp.159-176，東海大学出版会.
9) EPA (1997) Technology alternatives for the remediation of soils contaminated with As, Cd, Cr, Hg, and Pb, EPA/540/S-97/500, 1-20.
10) Arbiter, N. (1985) Section 5: Flotation, in "SME Mineral Processing Handbook" (Ed. Weiss N. L.), pp.1-98, American Instituted of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, New York.
11) 石田聖一，赤木寛一，毛利光男，田中仁志 (2004) 粘土懸濁粒液の凝集沈降特性からみた凝集剤の性能評価，第39回地盤工学研究発表会，2247-2248.
12) Smar, V. D., Klimpel, R. R. and Aplan, F. F. (1994) Evaluation of chemical and operational variables for the flotation of copper ore, Part 1 – Collector concentration, frother concentration, and air flow rate, *Journal of Mineral Processing*, **42**, 3/4, 225-40.
13) Bhaskar, Raju G. and Prabhkar, S. (2000) Beneficiation of fluorspar by column flotation, *Minerals & Metallurgical Processing*, **17**, 3, 167-172.