

土壌洗浄における液体サイクロンシステムのモデル化

毛利光男* 田中仁志* 赤木寛一**

Modeling of Hydrocyclone Circuit on Particle Separation during Soil Washing

Mitsuo MOURI*, Masashi TANAKA* 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

Grain-size distributions of both the underflow and overflow from the hydrocyclone circuit with hydrocyclones C1 and C3 are studied both in the full-scale plant and bench-scale plant. The separation performance of a hydrocyclone is expressed by a separation curve representing the probability of a particular particle ending up in either the underflow or the overflow. A particular configuration of a hydrocyclone circuit with C1 and C3 can benefit both separation performance and production of clean, good quality sand to minimize misplacement of fine particles between sand and sludge (fine fraction). After the first cycloning step, the separated flow with fine particles (C1 overflow) may still contain sand particles which increase an amount of residue. Cyclone C3 is included in the cycloning process to remove any sand fraction still present in the sludge. This can considerably reduce further the landfill cost.

A mathematical model was developed to simulate the steady-state grain-size distribution of the C1 underflow (UFC1), which represents the clean sand, in the hydrocyclone circuit with C1 and C3. It was shown that the grain-size distribution of UFC1 is better described by the presented model, which helped determine an amount of clean sand and the cost of soil washing for contaminated soil. The concept and numerical formulas of the presented model are introduced and discussed.

Key words: hydrocyclone, cyclone-circuit model, grain-size distribution, d50 cut point, separation efficiency

1. はじめに

汚染土壌の浄化・修復には、化学物質の種類によって様々な浄化技術が適用される。実際のサイトでは複数の化学物質によって汚染されている場合も多いため、低コストかつ適用範囲の広い浄化技術が望まれている。

土壌洗浄法(Soil washing)は、油、VOCs、重金属類、農薬、PCBなどの多くの汚染物質に対して幅広く適用可能な浄化技術である¹⁻³⁾。EPAの解説⁴⁾では、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と記されている。これによって、場外処分(管理型処分場など)の対象量が汚染土壌全量(100%)から汚染されている細粒子分の量(10~30%)へ大幅に低減するため、低コストの土壌処理が可能となる。土壌洗浄法の大きな利点の1つは、“汚染土壌の減量率(volume reduction)”である^{5,6)}。2002年にオランダA&J社から技術導入した移動式土壌洗浄プラント(Mobile

Remediation Plant(MRP))は、(a)洗浄効率が高い(含有除去率;80~99%)、(b)処理能力が大きい(35~40ton・hr⁻¹)、(c)鉱物油、PAHs、重金属、シアン等の多くの物質に幅広く適用が可能、(d)低コスト処理が可能といった優れた能力を有している⁷⁻⁹⁾。本土壌洗浄プラントでは、2003年9月から2004年3月までに累計約16万tonの汚染土壌処理を行った。

Fig. 1にMRP土壌洗浄技術の要点を示す。汚染土壌は、2段式湿式スクリーンにより2mm以上の礫・粗砂を取り除いた後、液体サイクロンによって汚染物質の多くが付着している細粒子分(粘土、シルト)と砂・細砂分に分離される。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、泡浮遊式分離機(floatation)¹⁰⁾に入る。ここで砂中の汚染物質が洗浄・分離される。泡浮遊式分離機で洗浄された砂・細砂分は、重力分離機と脱水機を経て洗浄砂となる。汚染物質が濃縮されている濃縮残渣は脱水ケーキとして場外処分される。Fig. 1に示すように、粒度構成(乾燥重量比)が、礫・粗砂分25%、砂・細砂50%、細粒子分25%の場合では、

* 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 〒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

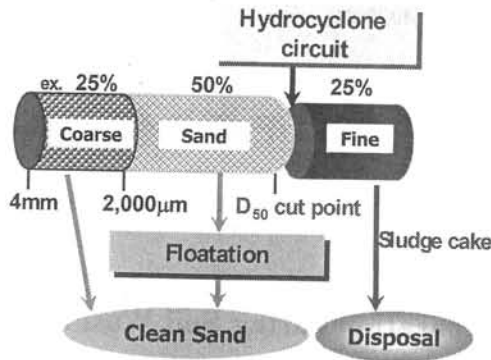


Fig. 1 MRP soil washing process schematic

再利用量が75%，場外処分量が25%となる。

MRP 土壌洗浄では、3種類の液体サイクロン (C1～C3) が設置され、50%分級径の最も大きいC1と最も小さいC3は砂分と細粒子分の分級に、中間サイズのC2は洗浄砂の脱水に使用する。本論文では、このC1とC3から構成される液体サイクロン系統の分級特性について検討する。

湿式スクリーンを通過した2mm以下の汚染土壌は、サイクロン系統へ投入される前に大量の水と混合攪拌されて10～30%のスラリーになる。C1とC3のサイクロン系統は一部の配管の切り替えによって、スラリーの流れが一方方向であるカスケード型の運転とスラリーの一部がサイクロン系内で循環する循環型の運転の両方が可能である。C1とC3を循環型に配置した場合のサイクロン系統では、循環するスラリー流量を調整することによって土壌の粒度構成と汚染分布から最適と判断される分級点で自在に細粒子分を分離できるため、洗浄砂の品質を保ちながらスラッジ分を減量することが可能である。

汚染土壌の細粒子分の割合や累積粒度分布曲線は、汚染サイトによって大きく異なる。サイクロン系統では、汚染土壌の粒度分布とサイクロンアンダーフローの粒度分布との対応を正確に把握することが、洗浄砂の品質管理を行う上で非常に重要である。循環型ではスラリーの一部がサイクロン系内で循環し、C1及びC3サイクロンのアンダーフローとオーバーフローの粒度分布は平衡状態に達するまで循環回数によって変わっていく。このため、循環型のサイクロンアンダーフローの粒度分布を求めることは、カスケード型の場合に比べて格段に難しい。

本研究では、土壌洗浄の主要な分離プロセスである液体サイクロン系統における投入土壌 (Feed) とサイクロンアンダーフローの粒度分布の対応を把握することを目的に、循環型の液体サイクロン系統における土壌粒子の分級特性を実験とモデル解析の両面から検討した。最初に実際の汚染土壌の粒度分布と、液体サイクロンによる分級の基礎式を紹介する。次に循環型のサイクロン系統のモデル化を行う。小型プラント及び実プラントで実験した液体サイクロンのデータとモデル計算値とを比較することによって本モデルの有効性を明らかにした上で、汚染土壌とサイクロンアンダーフローの粒度分布の関連を詳細に検討する。

2. 汚染土壌の粒度分布

汚染土壌の粒度分布は、汚染サイトによって様々であ

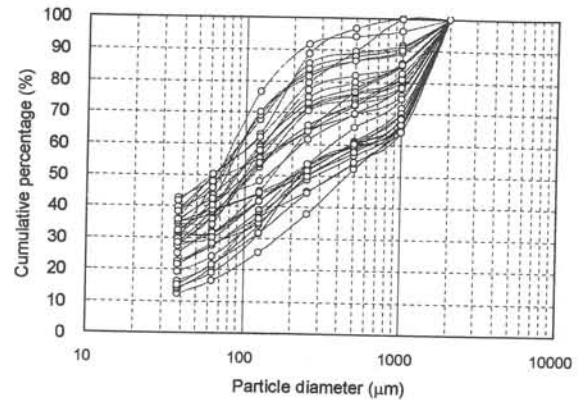
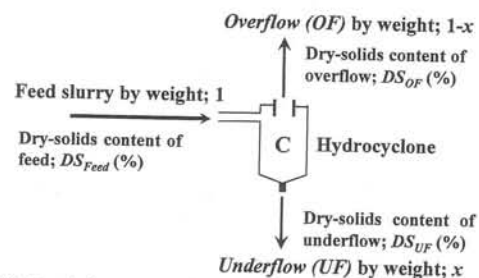


Fig. 2 Grain-size distributions of soil samples

(a) Overflow and Underflow



(b) Particle separation

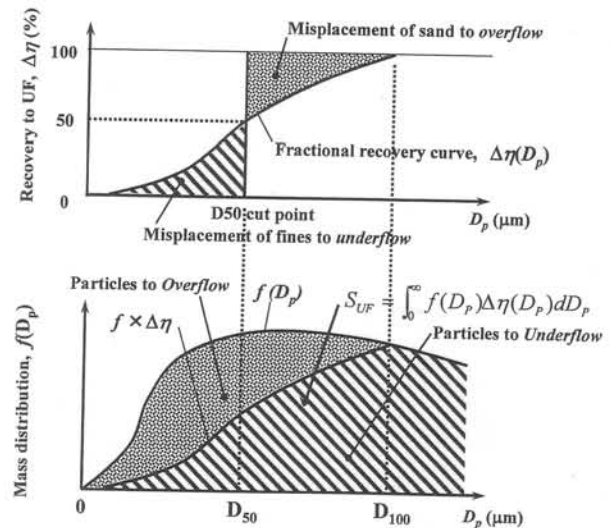


Fig. 3 Schematic of hydrocyclone and particle separation

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掘削した場所によって土壌粒度分布が異なる場合が少なくない。篩によって2mm以下に分級された各汚染サイトの汚染土壌の粒度分布を Fig. 2 に示す。汚染サイトによって土壌試料の累積粒度分布曲線の形、及び細粒子分の割合が大きな土壌も少なくないことが認められる。

汚染土壌の洗浄に当たっては、投入する汚染土壌とサイクロンアンダーフローの粒度分布の対応を的確に把握することが重要である。特に細粒子分には汚染物質が附着しやすいため、アンダーフロー中の細粒子分量とその粒度分布が洗浄砂の品質に大きく影響する。

3. 液体サイクロン系統

3.1 液体サイクロン

液体サイクロンは、単位床面積当りの分級能力が非常に大きいこと、構造が簡単であり可動部分を有さないため、処理性能が安定かつ、故障しにくいことを特長とする。このため液体サイクロンは粒子の分級、濃縮、捕集等の用途に幅広く適用されている¹¹⁻¹³⁾。

Fig. 3 (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。投入土壌(Feed)スラリー、オーバースロー、アンダーフローの固形物含有率(%)をそれぞれ DS_{Feed} , DS_{OF} , DS_{UF} とし、オーバーフローとアンダーフローの重量比を $1-x:x$ とすると、以下の関係式が得られる。

$$DS_{Feed} = DS_{UF} \cdot x + DS_{OF} \cdot (1-x) \quad (1)$$

サイクロンの分級効率 $\Delta\eta(D_p)$ 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(fractional recovery curve)で表される^{12,13)}。分級効率曲線は、フィードスラリーとアンダーフローの試料を採取し金網篩で篩い分けを行い、粒度別にアンダーフローに出力される固形物量を測定することによって算出される。また、アンダーフローへ流出する比率 x は、それぞれの固形物含有率を(1)式へ代入することによって求められる。分級効率が50%となる粒径 D_{50} は、サイクロンの分級点を示す値としてよく用いられる。この D_{50} の値は、Vortex finder径、円筒部内径、流入口径等の大きさによって変化する¹²⁾。また、下部流出口の面積を縮小するとアンダーフローの濃度は増加し、下部流出口の面積を大きくするとアンダーフローはスプレー状の低濃度の流出になる。

Fig. 3 (b)に分級効率 $\Delta\eta(D_p)$ のサイクロンが粒度分布 $f(D_p)$ の原料を分級する場合の模式図を示す。区間 ΔD_p の粒子がアンダーフロー側へ流出する量は、 $f(D_p)\Delta\eta(D_p)\Delta D_p$ で示されるため、アンダーフローへ流出する固形分の総量は(2)式で求められる¹³⁾。

$$S_{UF} = \int_0^\infty f_n(D_p) \Delta\eta(D_p) dD_p \quad (2)$$

ここで、 $f(D_p)$: Feedの濃度、 $\Delta\eta(D_p)$:サイクロンの分級効率、 D_p : 粒子径、 S_{UF} : アンダーフローの固形分総量

3.2 液体サイクロン系統

2つの液体サイクロン(C1, C3)によるサイクロンの構成をFig. 4に示す。図中に示したようにC3のアンダーフローがポンプピットへ戻り、新しい原料(Feed)と一緒にC1へ流入する場合は循環型(Circulation)、C3のアンダーフローがそのまま流出するカスケード型(Cascade)の2種類の運転が可能である。

液体サイクロンがカスケード型に配置された場合のC1アンダーフロー、C3のアンダーフローとオーバーフローの固形物と粒度分布は原料(feed)の粒度分布と各粒度に対するC1及びC3の分級効率から得られる分級量と粒度分布を順次計算することにより容易に求められる。

液体サイクロンが循環型に配置された場合には、C3ア

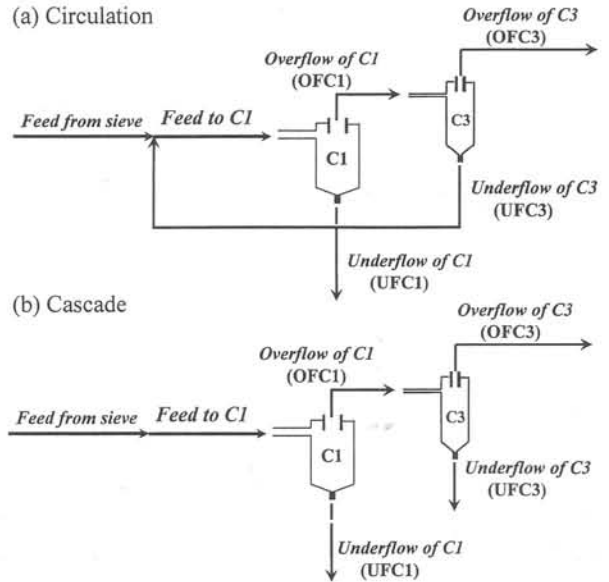


Fig. 4 Cyclone-circuit schematic, Circulation and Cascade

ンダーフローがC1へ戻るため、ある粒度分のフィードに対してサイクロン系統が安定(平衡)状態になるまでは多少の時間が必要である。C3アンダーフローにフィードが加わったものが新しいフィードとしてサイクロン系統に流入するためC1及びC3のアンダーフローとオーバーフローも平衡状態に達するまで循環とともにその粒度分布や固形分量が変化していく。このため、循環型のサイクロン系統の場合は入力(feed)の粒度分布に応答する出力(underflow(UF), overflow(OF))の粒度分布を求めるには、4章に示すようなモデル解析を行う必要がある。

4. 液体サイクロンシステムのモデル化

4.1 モデル化

循環型に配置された液体サイクロンシステムのモデル化を行う。このモデルでは、平衡状態におけるサイクロンアンダーフローとオーバーフローの粒度分布を求めることを目的とする。モデル化に当たっては、以下の仮定を行う。

- 1) 2段湿式フルイ通過後の土壌粒度分布($f_0(D_p)$)が一定
- 2) C1へのスラリー流量(Q_1)が一定
- 3) C1へのスラリー固形分量(S_{FeedC1})が一定(定常状態)

2段湿式フルイ通過後の汚染土壌の粒度分布は一定であるという仮定より、

$$\int_0^\infty f_0(D_p) dD_p = S_0 (=const.) \quad (3)$$

$t=nT$ の時にC1へ入力されるスラリー中の固形分量 $S_{FeedC1}(n)$ は、次式で表される。

$$S_{FeedC1}(n) = \int_0^\infty f_n(D_p) dD_p \quad (4)$$

従って、 $t=nT$ の時の S_{UFC1} と S_{OFC1} は、

$$S_{UFC1}(n) = \int_0^\infty f_n(D_p) \cdot \Delta\eta_{C1}(D_p) dD_p \quad (5)$$

$$S_{OFC1}(n) = \int_0^{\infty} f_n(D_p) \cdot (1 - \Delta\eta_{C1}(D_p)) dD_p \quad (6)$$

ここで $g_n(D_p) = f_n(D_p) \cdot (1 - \Delta\eta_{C1}(D_p))$ とおくと,

$$S_{OFC1}(n) = \int_0^{\infty} g_n(D_p) dD_p \quad (7)$$

OFC1 が C3 への入力となるため,

$$S_{UFC3}(n) = \int_0^{\infty} g_n(D_p) \cdot \Delta\eta_{C3}(D_p) dD_p \quad (8)$$

$$S_{OFC3}(n) = \int_0^{\infty} g_n(D_p) \cdot (1 - \Delta\eta_{C3}(D_p)) dD_p \quad (9)$$

C1 へ入力されるスラリーの固形分量は一定であるという条件より, (10)式が成立する。

$$S_{FeedC1}(n) = S_{Feed}(n) + S_{UFC3}(n-1) = S_0 \quad (10)$$

(10)式へ(3)式, (4)式, 及び(8)式の関係代入すると $t = nT$ の時に C1 へ入力されるスラリーの粒度分布 $f_n(D_p)$ を示す(11)式が得られる。

$$f_n(D_p) = ((S_0 - S_{UFC3}(n-1)) / S_0) \cdot f_0(D_p) + g_{n-1}(D_p) \Delta\eta_{C3}(D_p) \quad (11)$$

(5)式, (6)式, (8)式, (9)式, 及び(11)式を順次平衡状態に達するまで計算することにより, Fig. 4 (a)のサイクロン系における UFC1 と OFC3 の粒度構成を求めることができる。 $t = nT$ の時の UFC1 の粒度分布 $UFC1_n(D_p)$, OFC3 の粒度分布 $OFC3_n(D_p)$ は, (12)式と(13)式で表される。

$$UFC1_n(D_p) = f_n(D_p) \cdot \Delta\eta_{C1}(D_p) \quad (12)$$

$$OFC3_n(D_p) = g_n(D_p) \cdot (1 - \Delta\eta_{C3}(D_p)) \quad (13)$$

4.2 計算結果と考察

液体サイクロン C1 と C3 の分級効率曲線を Fig. 5 に示す。Fig. 5 の分級効率曲線は, メーカーの性能曲線に対して実験で得られた分級効率データによる修正を加えたものである。アンダーフロー (UF) とオーバーフロー (OF) の流量比は C1 が 15 : 85, C3 が 5 : 95 である。

フィードと C1 アンダーフローの粒度分布の差異は, 細粒子分を多く含むフィードの場合に大きくなることが予想されたので, 実験とモデル解析の比較検討は, 細粒子分を多く含むフィードに対して行った。実験 (運転) に際しては, 系全体のバランスが安定していることを確認した上で, フィードと液体サイクロン (C1, C3) のアンダーフローとオーバーフローの試料採取を行った。C1 のアンダーフロー (UFC1), C3 のオーバーフロー (OFC3), 投入土壌 (feed) の粒度分布とモデル計算値を Fig. 6 に比較して示す。

フィードについては, 計算する上で連続した粒度分布が必要なため, $38\mu\text{m} \sim 2,000\mu\text{m}$ の粒度データは内挿を $38\mu\text{m}$ 未満の粒度データについては外挿を行った。サイクロンモデルの計算条件を以下に記す。

- 1) $S_{FeedC1} = 38.8 \text{ ton} \cdot \text{h}^{-1}$
- 2) $Q_1 = 170 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
- 3) $\rho = 2.6 \text{ ton} \cdot \text{m}^{-3}$

Fig. 6 からは, UFC1 のモデル計算値は実測値に比較的良好一致していること, OFC3 の計算値は実測値よりも細粒子分の多い構成になっていることが認められる。UFC1 の粒度分布は, 当然の事ながら Fig. 5 に示した C1 及び C3 の分級効率曲線の両方に影響されていることが見て取れる。Fig. 6 のように細粒子分を多く含むフィードの場合, C1 のアンダーフロー (UFC1) の粒度

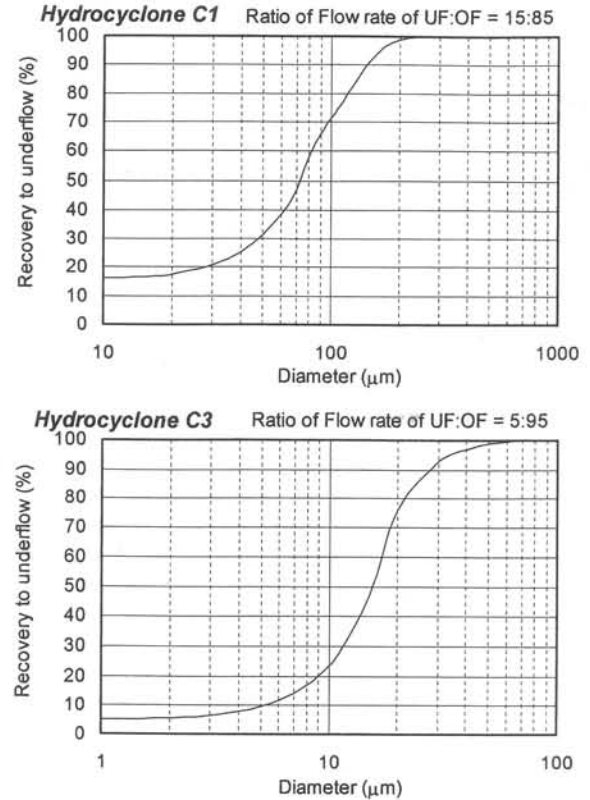


Fig. 5 Fraction recovery curves of C1 and C3

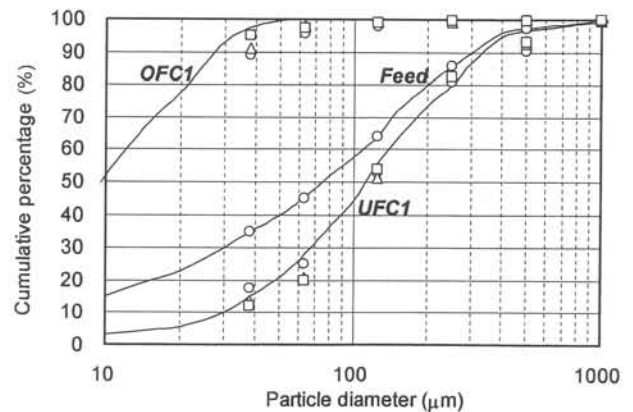


Fig. 6 Comparison between observed data and calculated results as to UFC1 and OFC3

分布はフィードの粒度分布と大きく変化することがわかる。

本モデル解析によって, 洗浄砂の主体となる C1 のアンダーフロー (UFC1) の粒度分布を概ね計算できることが確認できたので, 本モデルを用いて (a) 細粒子分を多く含むフィード, (b) 砂分を多く含むフィードに対する C1 アンダーフロー (UFC1) の粒度分布の検討を行った。Fig. 2 の左端の粒度分布を細粒子分の多いフィード (silty feed) に, 右端の粒度分布を砂分の多いフィード (sandy feed) として設定した。それぞれのフィードに対する C1 のアンダーフロー (UFC1) の粒度分布の計算結果を Fig. 7 に示す。Fig. 7 より C1 及び C3 の液体サイクロンシステムによって出力される C1 アンダーフロー (UFC1) の粒度分布は, フィードの粒度分布と大きく異なること, その変化量は粒子径の小さい方で大きなこと

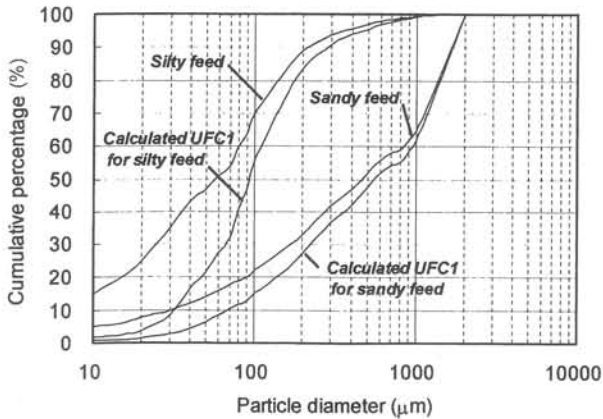


Fig. 7 Grain-size distributions of UFC1 for sandy feed and silty feed

が認められる。UFC1の粒度分布の変化は、砂分の多いフィード (sandy feed) よりも細粒子分の多いフィード (silty feed) の方が大きなことがわかる。また、Fig. 7のアンダーフローの計算値は、Fig. 2に示したように汚染土壌 (feed) の両端の粒度分布が入力された場合の値であるので、洗浄砂の粒度分布のほとんどはこの計算値の範囲に入るものと考えられる。また、汚染土壌 (feed) の粒度分布が既知の場合は、本モデル解析によって洗浄砂の粒度分布を予め把握することも可能であると考えられる。この事は、汚染土壌の受け入れを判断する上で非常に有益な情報を与える。

5. ま と め

本研究では、土壌洗浄の主要な分離プロセスである液体サイクロンシステムにおける投入土壌 (Feed) とサイクロンアンダーフローの粒度分布の対応を把握することを目的に、循環型の液体サイクロンシステムにおける土壌粒子の分級特性を実験とモデル解析の両面から検討した。得られた主な結果を以下に要約する。

1) 2つの液体サイクロン (C1, C3) による循環型サイクロンシステムのモデル化を行った。本モデル解析によって、洗浄砂の主体となる液体サイクロンC1のアンダーフロー (UFC1) の粒度分布は概ね計算できることが確認できた。

2) C1及びC3の液体サイクロンシステムによって出力されるC1アンダーフロー (UFC1) の粒度分布は、フィードの粒度分布と大きく異なること、その変化量は粒子径の小さい方で大きなことがわかった。

3) UFC1の粒度分布の変化は、砂分の多いフィード (sandy feed) よりも細粒子分の多いフィード (silty feed) の方が大きなことが判明した。

4) 本モデル解析によって、洗浄砂の粒度分布の範囲を予め把握することができる。これは、汚染土壌の受け入れを判断する際に非常に重要な情報である。

液体サイクロンシステムで分離・除去された細粒子分は、濃縮残渣として場外処分される。この場外処分費用は重量当りの金額となるため、可能な限り含水率の低い脱水ケーキが得られる方法と条件の検討を進める予定である¹⁴⁾。

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部の礪直子氏、羽田義治氏、菅原尚也氏、熊本進誠氏 (現 環境建設エンジニアリング株式会社)、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受けた。液体サイクロンシステムの実験とモデル解析に当ってはA&G Milieutechniek社のMarc F. Pruijn氏、Koen A. van Olst氏から有益な助言を受けた。ここに記して謝意を表します。

(原稿受付 2004年4月16日)

(原稿受理 2004年7月13日)

使用記号

- S_{Feed} : Solids in feed slurry from sieve
- S_{FeedC1} : Solids in feed slurry to C1
- S_{UFC1} : Solids in underflow of C1
- S_{OFC1} : Solids in overflow of C1
- S_{UFC3} : Solids in underflow of C3
- S_{OFC3} : Solids in overflow of C3
- Q_1 : Flow rate of feed slurry to C1
- Q_{UFC1} : Flow rate of underflow of C1
- Q_{OFC1} : Flow rate of overflow of C1
- Q_{UFC3} : Flow rate of underflow of C3
- Q_{OFC3} : Flow rate of overflow of C3
- T : Theoretical retention time of solids in the cyclone circuit
- $f_0(D_p)$: Grain-size distribution of feed slurry from sieve
- $f_n(D_p)$: Grain-size distribution of feed slurry to C1 at $t = nT$ ($n = 1, 2, 3, 4, \dots$)
- $\Delta\eta_{C1}(D_p)$: Size recovery to underflow of C1
- $\Delta\eta_{C3}(D_p)$: Size recovery to underflow of C3
- UFC1 : Underflow of C1
- OFC1 : Overflow of C1
- UFC3 : Underflow of C3
- OFC3 : Overflow of C3
- ρ : Density of soil particle

参 考 文 献

- 1) EPA (1993) Selecting Remediation Techniques for Contaminated sediment, 823-B93-001, p.58.
- 2) Abumaizar, J.R. and Smith, H.E. (1999) Heavy metal contaminants removal by soil washing, *Journal of Hazardous Materials*, **B70**, 71-86.
- 3) Sheets, G.R. and Bergquist, A.B. (1999) Laboratory treatability testing of soils contaminated with lead and PCBs using particle-size separation and soil washing, *Journal of Hazardous Materials*, **66**, 137-150.
- 4) EPA (2001) A Citizen's Guide to Soil Washing, 542-F-01-008.
- 5) Mann, J.M. (1999) Full-scale and pilot-scale soil washing, *Journal of Hazardous Materials*, **66**, 119-136.
- 6) Anderson, R., Razor, E. and Van Ryn, F. (1999) Particle size separation via soil washing to obtain volume reduction, *Journal of Hazardous Materials*, **66**, 89-98.
- 7) 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) による汚染土壌の浄化, *土壌環境センター・技術ニュース*, **7**, 36-38.
- 8) 毛利光男 (2002) 重金属類による土壌汚染の修復技術とその対

- 応事例(その2)高効率土壌洗浄プラント(MRP)による土壌浄化, EPOC産業エコロジー部会 第6回セミナー資料, pp. 2-11-2-21.
- 9) 毛利光男(2004)新しい土壌浄化・修復技術, 防衛施設と技術, 52, 31-38.
- 10) 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.
- 11) 吉田英人, 秋山聡, 福井国博, 熊谷彰(2001)改良型液体サイクロンによる微粒子の分級, 粉体工学会誌, 38(9), 626-632.
- 12) 石田巽(1998)工場操作シリーズ 新增補 分級・選別, 2.2 湿式分級器, pp.27-38, 化学工学社, 東京.
- 13) 水科篤郎, 桐栄良三編(1979)化学工学概論, pp.252-255, 産業図書, 東京.
- 14) 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.