

自然由来ヒ素汚染土壌の分離浄化処理工法の開発

山本達生・岩田将英・増田昌昭

近年、地下構造物が輻輳する大都市圏内では大深度地下での建設工事が増え、その過程で遭遇する自然由来ヒ素汚染土の処分が大きな課題となっている。

このため、粒径が大きくかつ多孔質形状を有する特殊鉄粉を用いて、泥水式シールド工法にて発生する廃棄泥水を土壤環境基準値未満に浄化する工法を開発した。

本開発工法では、重金属類の吸着剤として特殊な鉄粉を用いると共に、これに適した遠心分離・磁性分離の二段階処理で廃棄泥水から効率的にヒ素を吸着した特殊鉄粉を回収することで、設備の大幅なコンパクト化を実現した。

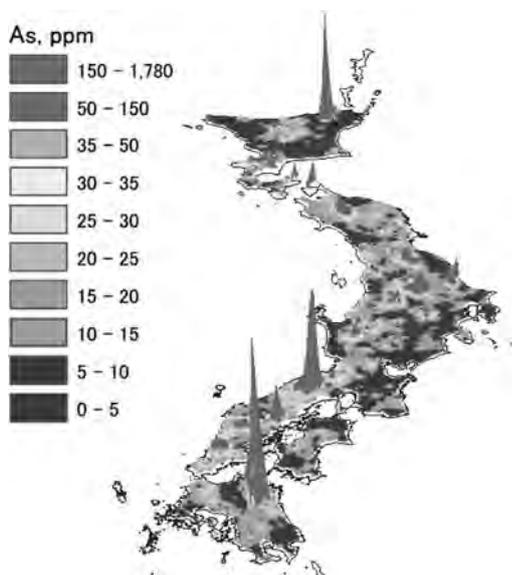
本報では、開発した工法の概要及び実汚染土壌への適用性について報告する。

キーワード：自然由来ヒ素、泥水式シールド工法、汚染土壌、浄化、特殊鉄粉

1. はじめに

国内における自然由来のヒ素元素の3D分布¹⁾を図一1に示す。これより、局所的にヒ素濃度の高い地域が存在するだけでなく、低濃度であれば日本全国至る所に自然由来ヒ素が存在することが分かる。

また、既知の文献によれば、関東平野や濃尾平野等の大深度地下に分布する上総層群土丹層や熱田層では、自然由来ヒ素等の重金属が顕在化していることが報告されている^{2), 3)}。



図一1 ヒ素元素の分布図¹⁾

一方、今後リニア中央新幹線、外かく環状道路などの大深度地下空間の活用が前提となる大型プロジェクトが控えていることから、日本汚染土壌処理業協会では、自然由来汚染土壌の処分量が年間300百万t増えると推計している⁴⁾。汚染土壌の適正処分には一般土砂処分以上の費用が加算されるため、事業費高騰の懸念が大きな課題とされている。

汚染原因となる重金属類は、砂やシルトに比べ腐植土や粘土に強く吸着され濃度が高くなる傾向がある⁵⁾。このため、大深度地下の粘性土地盤のトンネル掘進を想定し、泥水式シールド工法の廃棄泥水等を対象とした自然由来ヒ素の浄化工法を開発した。

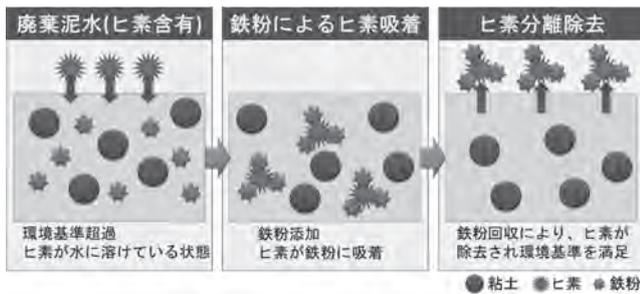
本報は、①開発工法の概要、②実規模プラントによる分離浄化結果についてまとめたものである。

2. 開発工法の概要

(1) 開発技術の基本原則

泥水式シールド工法等で自然由来ヒ素汚染地盤を掘削した際、廃棄泥水に溶出したヒ素イオンが土壤環境基準超過の要因となる。このため、図一2に示すように、ヒ素イオンを鉄粉に吸着させた後、鉄粉を回収することで浄化ができると考えた。

なお、鉄粉によるヒ素除去は地下水汚染浄化等で多数の実績がある技術である。



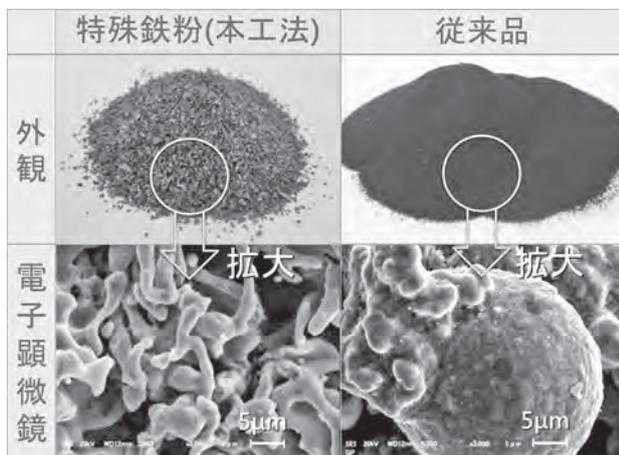
図一 2 ヒ素浄化原理

(2) 特殊鉄粉

本工法で使用する特殊鉄粉及び従来の同様技術で用いられる鉄粉（以下、従来品とする）の外観と電子顕微鏡観察結果を写真一に示す。本工法で使用する特殊鉄粉は従来品と比較して、①平均粒径が6倍程度大きい、②表面積が大きい（多孔質形状）といった特徴を有している。このため、図一3に示すよう、本来二律背反する回収の容易さとヒ素吸着能力の高さを併せもった特徴を有している。

当該特殊鉄粉のヒ素吸着能力を確認するため、神奈川県港湾地域から採取した上総層群土丹層によるヒ素浄化試験を行った。

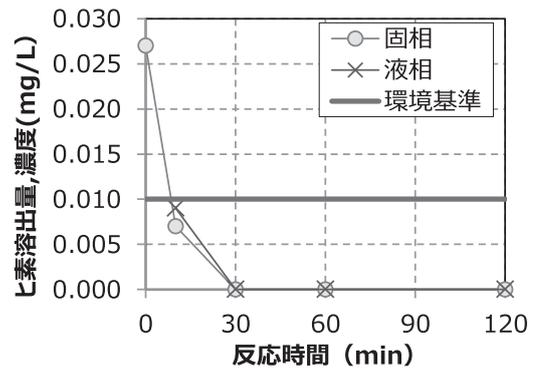
当該土壌を水道水で泥水密度 1.32 t/m³ となるよう調整した結果、環境基準 (0.01 mg/L) を3倍弱超過する自然由来ヒ素汚染泥水が得られた。この模擬汚染



写真一 1 特殊鉄粉の外観と電子顕微鏡写真



図一 3 特殊鉄粉の特徴と効果



図一 4 ヒ素分離除去室内試験結果

廃棄泥水に対し、特殊鉄粉を 0.3 wt% -DS 添加し、反応時間を 30 分程度確保することで、固相、液相ともヒ素を検出下限値以下にまで分離除去できることを確認した (図一4)。

(3) 鉄粉回収設備 (ヒ素除去工程) の概要

特殊鉄粉の吸着能力は、自然由来汚染土壌からのヒ素溶出量に対して十分に大きいことから、飽和に至るまでには数十回程度の再利用が見込まれる。このため、鉄粉回収設備に求められる要件は、①浄化泥水中に砒素を吸着した鉄粉を残さずに回収すること、②鉄粉回収の際に地山由来の砂分を極力取り込まないことである。

従来技術では、遠心分離または磁性分離設備を単一で使用方法が行われてきた。遠心分離設備のみで従来品の鉄粉を回収する場合、浄化泥水中に粒径の小さな鉄粉を残さないよう強い遠心力を作用させるため、鉄粉と共に砂分 (細砂) も回収されることとなる。この砂の粒径は、作用させる遠心力で決まるため、鉄粉を n 回繰返し回収した場合、処理対象泥水 n 回分に含まれるすべての砂分が鉄粉と共に回収されるため、砂分量が鉄粉を再利用する度に増加するジレンマ現象が課題となる。

また、磁性分離機のみで鉄粉を回収する場合、特に大型プロジェクトでは最大 700 m³/R 強の廃棄泥水が発生するため、土木工事では特殊設備となる磁性分離機を複数台設置する必要が生じ、設置面積の確保や運転維持管理が煩雑になるなどの課題が生じる。

上述の課題解決を目的に、鉄粉の回収効率を高め大幅な小型化を可能とする処理設備 (図一5) を考案した。本設備は、平均粒径が大きい特殊鉄粉の特徴を最大限に活かすため、サイクロンによる遠心分離と磁性分離機を組み合わせた二段階の鉄粉回収工程を備えたものとなっている。

特殊鉄粉は従来品に対して平均粒径が大きく、かつ

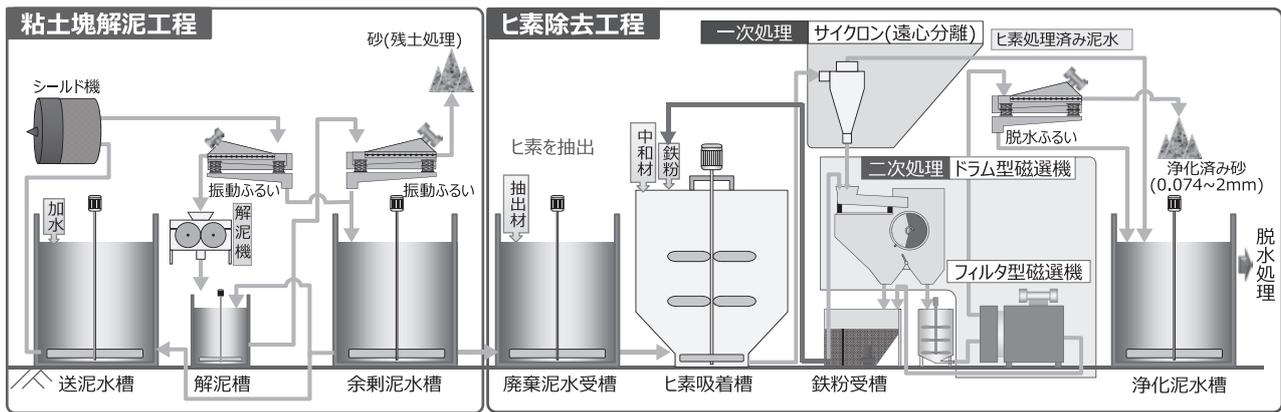


図-5 自然由来ヒ素の分離浄化工法概要図

比重も大きいいため、小さい遠心力でも容易に分離沈降させることが可能である。よって土木工事で一般的に用いられるサイクロンにより、特殊鉄粉が取り除かれた泥水（浄化泥水）と、特殊鉄粉・地山由来砂の濃縮物の分離が可能となる。一段階目となる本サイクロン処理により、浄化対象泥水の7～9割程度が浄化泥水として回収可能とされる。

2段階目の処理として、残りの1～3割程度となった濃縮物（特殊鉄粉+地山由来砂）からヒ素を吸着した特殊鉄粉を回収することで浄化処理が終了する。このため、磁性分離機のみで鉄粉を回収する従来技術と比較すると、本開発工法では磁性分離機による処理対象が1～3割となり、設備能力を1/3～1/10に小型化することが可能となる。

なお、鉄粉回収設備を含むヒ素除去工程では、以下に示すStep1-1～1-4の工程により構成した。

- Step1-1：抽出材によるヒ素の溶出促進工程
- Step1-2：特殊鉄粉によるヒ素吸着工程
- Step1-3：サイクロンによる特殊鉄粉一次回収工程
- Step1-4：磁性分離機による砂と特殊鉄粉の分別工程

(4) 粘土解泥設備

本装置ではシールド廃棄泥水に含まれるヒ素を処理対象とすることは既に述べた。泥岩に区分される比較的硬質な上総層群土丹層をシールド掘削した場合、廃棄泥水には握り拳大粘土塊の混入が避けられない。この土丹塊は粘土粒子の集合体であり、土壤汚染対策法の規制対象となるため、土丹塊を効率よく泥水状に解泥・溶解することが重要となる。よって、図-5中の粘土解泥工程で示した設備群を併せて検討した。

拳大粘土塊の解泥・溶解状況を写真-2に示す。小割した土丹塊をロールクラッシャーに通過させることで、固結した粘土粒子に圧搾力が作用し、細かくばらばらに崩壊するため、サンドポンプ攪拌で効率的に



写真-2 土丹塊の解泥・溶解状況

解泥させることが可能であった。

- Step2-1：クラッシャーにより拳大土丹塊を2cm以下に小割
- Step2-2：ロールクラッシャーにより数mm大に解砕
- Step2-3：清水を加えてサンドポンプ攪拌し解泥

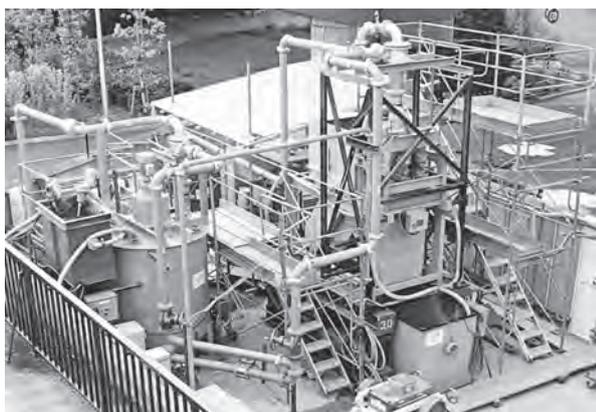
3. 実証プラントによる効果検証

(1) 実証プラントの概要

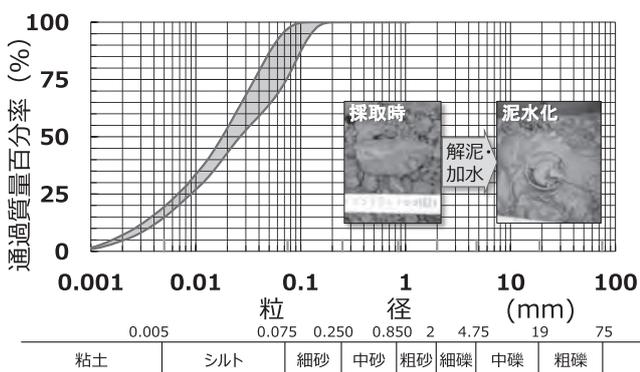
考案したプラントの分離浄化性能を明確にするため、処理能力40m³/h級の実規模プラントを140m²の敷地内に建設した（写真-3）。

(2) 浄化対象泥水の概要

浄化対象泥水は、東京都内港湾地域のGL-55～60mより掘削・採取した上総層群土丹を前述の土丹解



写真一3 実証プラント全景



図一6 浄化対象泥水の粒度分布

泥工程で解砕し、泥水密度 1.23, 1.26, 1.32 t/m³ に調整することで得た。解泥後の浄化対象泥水の粒度分布を図一6に示す。これより、浄化対象泥水には、3～25%程度の細砂が含まれていた。

(a) 浄化対象泥水のヒ素溶出量について

各処理工程ごとのヒ素溶出量を表一1に示す。表中にある“処理前土壌”とは未処理の掘削土壌を、“処理前泥水”は粘土塊解泥工程により解泥・泥水化した状態 (Step2-1～2-3 終了後) を、“抽出後”は抽出剤によるヒ素溶出促進工程後 (Step1-1 後) を、“処理後脱水土”は浄化終了泥水を脱水した後の脱水ケーキを、“処理後ろ液”は脱水処理時のろ液を示している。

これより、処理前土壌 (解泥前) のヒ素溶出量は 0.07～0.052 mg/L であり、環境基準 (0.01 mg/L) を満足するものもあったが、基準を 5 倍程度超過する土壌も含まれていた。これを解泥・泥水化 (分離浄化処理前) することで希釈され、ヒ素溶出量は低くなる傾向を示した。

一方、ヒ素抽出後 (Step1-1) では、全てのケースで環境基準を超過した。本工程により濃度上昇したヒ素は、土壌環境条件の変化により容易に溶出する形態のヒ素として存在していたと考えられる。浄化土の将来的な安全性を考慮すると、当該ヒ素抽出工程は重要

表一1 ヒ素濃度結果一覧表

Case No.	泥水密度 [t/m ³]	処理水量 [m ³]	ヒ素溶出量 [mg/L]				
			処理前		抽出後	処理前	
			土壌	泥水		脱水土	泥水
1-1	1.23	0.84	0.052	0.008	0.072	<0.005	<0.005
1-2		0.83	0.052	0.006	0.055	<0.005	<0.005
1-3		0.83	0.052	0.011	0.061	<0.005	<0.005
1-4		0.90	0.052	0.010	0.050	<0.005	<0.005
1-5		0.93	0.052	0.024	0.051	<0.005	<0.005
2-1	1.26	0.65	0.034	ND	0.036	<0.005	<0.005
2-2		1.07	0.007	ND	0.021	<0.005	<0.005
2-3		0.78	0.007	ND	0.018	<0.005	<0.005
2-4		0.83	0.052	0.008	0.033	<0.005	<0.005
3-1	1.32	0.71	0.034	ND	0.034	<0.005	<0.005
3-2		0.89	0.007	ND	0.044	<0.005	<0.005
3-3		0.80	0.007	ND	0.027	<0.005	<0.005
3-4		0.87	0.007	ND	0.024	<0.005	<0.005
3-5		0.83	0.007	ND	0.034	<0.005	<0.005
3-6		0.74	0.007	ND	0.029	<0.005	<0.005
3-7		0.73	0.052	0.016	0.055	<0.005	<0.005
3-8		0.56	0.052	0.022	0.066	<0.005	<0.005

な分離浄化プロセスの一つであると判断する。

(b) ヒ素浄化結果

特殊鉄粉添加量 3 wt% -DS・反応時間 30 分の条件で泥水中に溶解したヒ素を特殊鉄粉に吸着 (Step1-2) させた後、遠心分離 (サイクロン・Step1-3) および磁性分離 (Step1-4) により、浄化泥水とヒ素吸着済み特殊鉄粉を分別した。

浄化泥水は、脱水処理により処理後脱水土と処理後ろ液に分別し、それぞれヒ素溶出量とヒ素濃度分析を行った。この結果、表一1に示すように全てのケースでヒ素濃度は検出下限以下となり、分離浄化が確実に行われていることが証明された。

(c) サイクロン処理の有効性

サイクロンによる減容率、濃縮率を表一2に示す。図一7に示すように減容率はサイクロン処理により特殊鉄粉が除去された浄化泥水 (図一7中②) の、濃縮率は磁性分離機での処理が必要となる濃縮物 (特殊鉄粉+砂分) (図一7中③) の容積比率を示している。

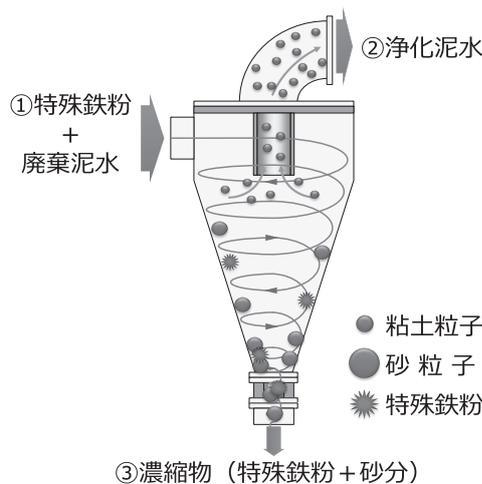
これより、磁性分離機での処理が必要となる濃縮物が 6.5～33.6%に濃縮されていることから、磁性分離機のみで鉄粉回収する場合の従来技術に比較して、設備規模も 1/3 程度に小型化できることが証明された。

サイクロン処理による浄化泥水と濃縮物の一例を写真一4に示す。これより、浄化泥水は細粒泥水状を、濃縮物は砂分と特殊鉄粉で砂っぽい状態となっていることが観察できる。

なお、比較のために行った粒径の細かい従来品の鉄

表一 2 サイクロンによる減容化率

Case No.	泥水密度 [t/m ³]	減容率 [%]	濃縮率 [%]
1-1	1.23	79.6	20.4
1-2		82.6	17.4
1-3		86.1	13.9
1-4		92.3	7.7
1-5		90.7	9.3
2-1	1.26	82.1	17.9
2-2		71.9	28.1
2-3		72.6	27.4
2-4		75.0	25.0
3-1	1.32	82.2	17.8
3-2		80.0	20.0
3-3		73.8	26.2
3-4		69.1	30.9
3-5		68.4	31.6
3-6		66.4	33.6
3-7		89.0	11.0
3-8		93.5	6.5



減容率 = ② / ① × 100
 濃縮率 = ③ / ① × 100

図一 7 減容化率と濃縮率

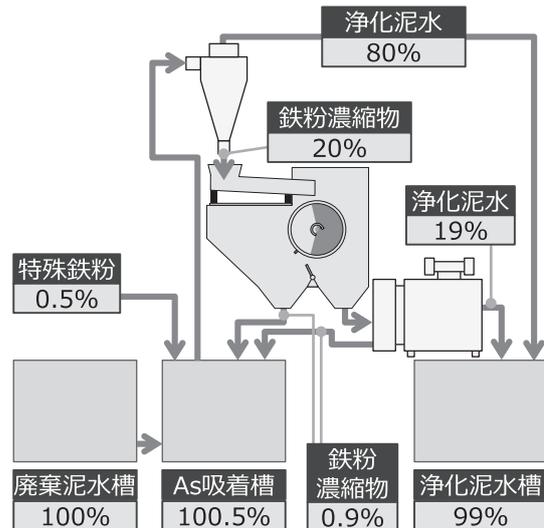


写真一 4 サイクロン処理物

粉を使用した場合、サイクロンでは添加した全ての鉄粉を回収することができなかった。

(d) 各処理工程における物質の重量比率

各処理工程における重量比で示したマテリアルフローの平均値を図一 8 に示す。当該処理工法においては、サイクロンによる遠心分離で特殊鉄粉を 20% に濃縮し、後段の磁性分離処理に係る負担を大きく縮減できることが証明できた。



図一 8 各処理工程における物質の重量比率

4. まとめ

本検討で得られた知見を以下にまとめる。

- ① 比較的硬質な握り拳大の上総層群土丹塊は、クラッシャーにより粉碎し、清水を加えてサンドポンプ攪拌することで、泥岩である土丹塊を効率よく解泥できることが判明した。
- ② 平均粒径は大きいが多孔質状であるため表面積の大きな特殊鉄粉の採用により、鉄粉回収効率とヒ素分離浄化能力を向上させた工法を確立した。
- ③ 特殊鉄粉の特徴を生かした、遠心分離と磁性分離の二段階処理の採用により、全体処理能力を向上させ、設備の大幅な小型化が図れた。
- ④ 本工法により分離浄化した脱水土・ろ液のヒ素濃度はともに環境基準を大幅に下回り、自然由来ヒ素を確実に浄化できる技術であることが証明できた。

5. おわりに

今後は、本工法の活用実績を増やし、連続・長期運転時の課題抽出と解決、更なる設備の小型化と処理コストの縮減を目的に、技術に研鑽を図っていきたい。

具体的には、分離回収効率の高さに着目し、特殊鉄粉の添加量を増やすことで処理時間の短縮、ひいては処理能力の向上につなげ、さらなる設備の小型化を図るなどの技術改善を進める所存である。

また、ヒ素以外の重金属類への対応や、重金属類の迅速分析法も開発中であり、自然由来重金属問題の解決に向けて貢献していきたいと考える。



《参考文献》

- 1) 環境科学講座第16回 元素の地図—地球化学図—, 東京電機大学工学部環境化学科
- 2) 島田允堯, 自然由来重金属等による地下水・土壌汚染問題の本質:ヒ素, 応用地質技術年報, No.29, pp31~59, 2009年
- 3) 神戸ら, 愛知県における砒素含有地下水の水質成分調査とヒ素除去手法の検討, 愛知県環境調査センター調査・研究所報, 38号, 2010年
- 4) 自然由来重金属含有土壌年間300万t増へ, 環境新聞, 21面, 2015年1月14日
- 5) 金子ら, 新潟県における自然由来のヒ素による地下水汚染の実態, 新潟県保健環境科学研究所年報, 第25巻, pp93~95, 2010年

【筆者紹介】

山本 達生 (やまもと たつお)
前田建設工業(株)
土木事業本部 技術開発グループ
チーム長



岩田 将英 (いわた まさひで)
前田建設工業(株)
土木事業本部 技術開発グループ
リーダー



増田 昌昭 (ますだ まさあき)
前田建設工業(株)
東京土木支店 施工第1グループ
マネージャー

