

油汚染土壌を用いた土壌洗浄法の実証実験

佐伯悌¹・安部聡²・高津忠³

¹正会員 (株) 銭高組 技術研究所(〒198-0024 東京都青梅市新町9-2222)

²正会員 (株) 銭高組 環境エンジニアリング部(〒102-0082 東京都千代田区一番町9 泉館一番町ビル)

³正会員 工博 (株) 銭高組 技術企画開発部(〒163-1024 東京都新宿区西新宿3-7-1 新宿パークタワービル24F)

油による汚染土壌の浄化工法の一つに土壌洗浄法とバイオレメデーション（微生物処理）を組み合わせた工法がある。この工法は油汚染土壌を洗浄によりある程度油分濃度を低減させ、その後微生物による油の分解を促し、清浄土として埋戻し等に使用するというものである。

本研究では、微生物処理の前処理という位置づけで実油汚染土壌を用いた予備実験およびプラントを用いた実証実験を行い、その洗浄効果を把握した。ここにその結果を報告する。

キーワード：油汚染土壌, 土壌洗浄法, 分級, 油分除去率

1. はじめに

近年、油槽所・工場跡地、ガソリンスタンド等において、油による土壌・地下水汚染の問題が顕在化している。平成15年2月に施行された土壌汚染対策法において油は特定有害物質に含まれていないが、油臭・油膜の発生が生活環境に悪影響を及ぼしているのが現状である¹⁾。油汚染土壌の浄化工法には熱処理、微生物処理、洗浄処理等が提案されており、その中でも微生物処理は比較的安価な工法である。しかしながら高濃度汚染土壌には対応が困難であることから、洗浄処理と微生物処理を組み合わせた浄化法が注目されている。

これらの背景のもと、土壌浄化を目的とし、一般的な機械を組み合わせた洗浄システムを構築し、油汚染土壌を用いて、土壌洗浄法の実証実験を行い、その効果および性能を把握した。

2. 土壌洗浄法

重金属や油により汚染された土壌の場合、土粒子中で比表面積が大きくイオン交換能力の高い粘土粒子（細粒分）に吸着する割合が大きいと言われている²⁾。また、ダストのような形態の汚染物質が混入している場合でもその粒径は小さい（ごみ焼却炉のばい塵で中位径 d_{50} ：15～22 μm ）³⁾。

このような前提から、土壌を洗浄・分級することにより可溶性の汚染物質を洗浄媒体である水あるいは溶媒中に溶解させるとともに、汚染物質の濃縮された細粒分を取り出す方法を土壌洗浄法という。図-1にその概念を示す。

洗浄の効果は汚染物質の種類・濃度ならびに土壌

の粒度分布により左右される。汚染物質の濃縮された細粒分は不溶化等を行い管理型処分場へ処分したり、セメント原料として再利用する必要がある。よって細粒分を多く含む土壌には一般的に不向きである。しかし、他の工法に比べて安価な可能性があるため、汚染物質の除去効果や処分費との兼ね合いで選択されるべき技術と言える。

本報告では、油汚染土壌を対象とした洗浄法（ミキシング・ソイルウォッシュ）について報告する。

3. 予備実験

(1) 目的

実証実験での機器構成、汚染除去での影響因子、油分除去率の推定を行うことを目的に、模擬汚染土壌を用いた予備実験を行った。

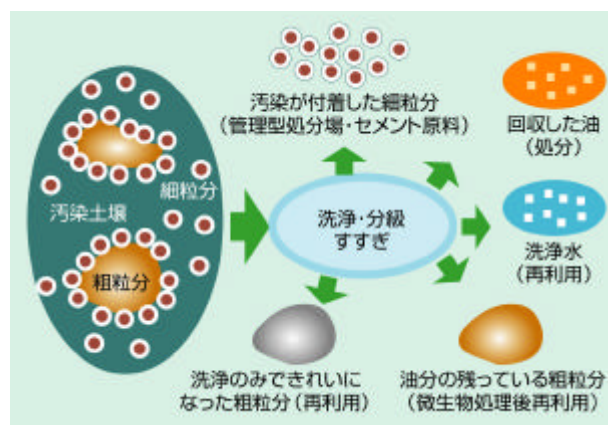


図-1 油汚染土壌における土壌洗浄法の概念

(2) 模擬汚染土壌

模擬汚染土壌は、1Lのガラスビーカーに500gの珪砂5号を入れ、A重油を添加・混合し、80℃×12時間の乾燥を行った後、12時間放冷するという手順で作成した。本操作での重量減少率と分析の結果得られた油分濃度の減少率は、ほぼ同等であった。よって、模擬汚染土壌の油分濃度は重量減少率から換算した値を採用した⁴⁾。

(3) パラメータ

汚染除去の影響因子を把握するため、表- 1に示すパラメータを設定し、試験を実施した。

(4) 実験方法

実験は、写真- 1に示す攪拌機により機械的に所定条件の攪拌を行った。サンプルは攪拌終了後1分間静置させ、浮遊している油層および液層部分を吸引除去して残った土壌とした。この操作を洗浄回数1回と定義した。また、ばっ気実験は、ビーカーの底部に送気ホースを設置し、所定条件のばっ気および攪拌を行った。サンプルの採取は攪拌実験と同様とした。ばっ気は4L/hの送気とし、ディフューザの有無により気泡径を変化させた。

採取サンプルの油分濃度については、TPHs (Total Petroleum Hydrocarbons) の分析 (二硫化炭素振とう抽出ーガスクロマトグラフ定量) を行った。

(5) 実験結果

パラメータごとの予備実験結果を下記に示す。

a) 攪拌時間

攪拌時間をパラメータとした試験結果を図- 2に示す。初期の攪拌で油分除去率【油分除去率 = $\{1 - (\text{回収土壌の油分濃度} / \text{原土壌の油分濃度})\} \times 100 (\%)$ 】が上昇し、その後はあまり変化が無くなることがわかった。また、ある程度の攪拌速度以上でも変化が見られないことがわかった。

b) 固液比

固液比 (重量比) をパラメータとした試験結果を図- 3に示す。土壌に対して水量を増加させても油分除去率は変化せず、固液比が1:1程度で十分であることがわかった。

c) 初期油分濃度

初期油分濃度をパラメータとした試験結果を図- 4に示す。初期油分濃度に係らず油分除去率は変化せず、油分除去率は70%程度であった。

なお、初期油分濃度は表-1に示したように添加し、試験を実施したが、「(2) 模擬汚染土壌」に示したようにA重油の添加・混合後に12時間の乾燥を行ったことからこの操作により多少の油分が試験前に減少し、図- 4に示す値となった。

d) 水温

水温をパラメータとした試験結果を図- 5に示す。水温を上げるにより油分除去率も上昇することがわかったが、プラント運転を考えた場合にコストの面で対応が困難と思われる。

表- 1 予備実験でのパラメータ

パラメータ	水 準
攪拌時間(分)	1, 2, 5
攪拌速度(rpm)	60, 150, 300, 600
固液比(1:X)	0.5, 1.0, 2.0
初期油分濃度 (mg/kg)	設定値 10,000, 20,000, 50,000, 75,000
水温(℃)	5, 20, 40
洗浄回数(回)	1, 2, 3, 4
ばっ気	有無, 気泡径



写真- 1 攪拌装置

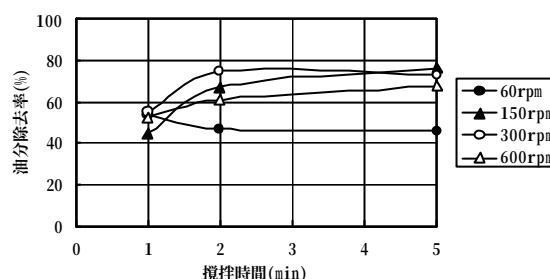


図- 2 攪拌時間をパラメータとした結果

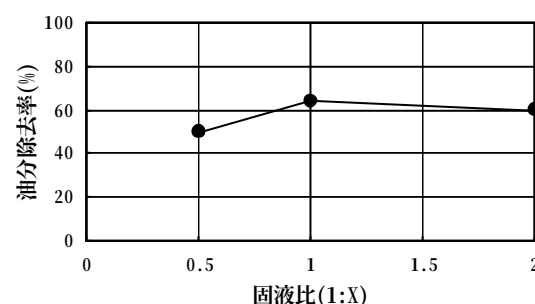


図- 3 固液比をパラメータとした結果

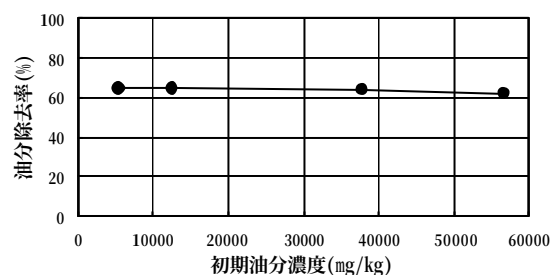


図- 4 初期油分濃度をパラメータとした結果

e) 洗浄回数

洗浄回数をパラメータとした試験結果を図- 6 に示す。洗浄回数を増加させることにより油分除去率も増加するが、直線的な除去率の増加では無いことがわかった。

f) ばっ気 (エアレーション)

ばっ気の有無をパラメータとした試験結果を図- 7 に示す。ばっ気のみではあまり効果は見られなかったが、機械攪拌と併用することにより、攪拌のみのケースに比べ、油分除去率が向上することがわかった。

また、ばっ気時の気泡径は小さいものほど、効果があることがわかった。

g) 予備実験のまとめ

これらの試験結果から得られた知見を整理し、表- 2 に示す。

4. 実証実験

(1) 目的

予備実験での結果を踏まえ、実際に浄化工事で用いる機器を選定し、洗浄実験を行い、浄化程度を把握するとともに、改良点、問題点の抽出を行う。

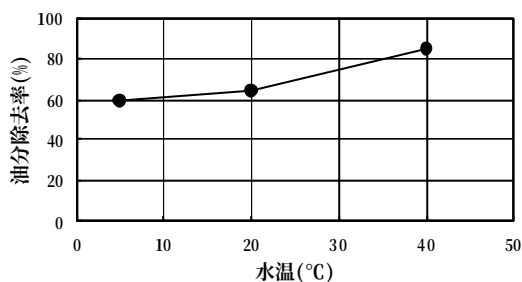


図- 5 水温をパラメータとした結果

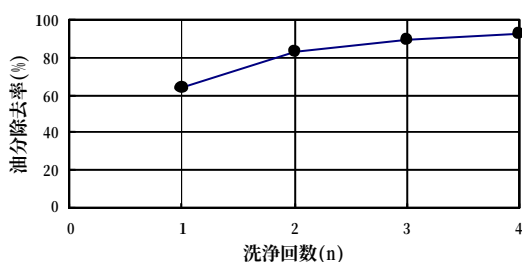


図- 6 洗浄回数をパラメータとした結果

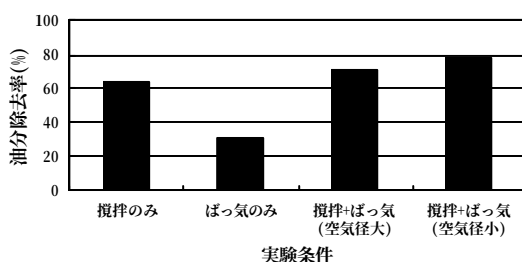


図- 7 ばっ気をパラメータとした結果

(2) システムの検討

予備実験の結果から図- 8 に示すシステムフローとした。微生物処理の前処理という考え方から、簡易な設備構成とした。本システムは、「攪拌」、「分級」、「すすぎ」の3工程とし、攪拌工程ではミキサによる強制攪拌により、解砕と洗浄を同時に行う。次に水平振動ふるいにより、油分濃度の低い粗粒分と、高い細粒分に分級とともに、粗粒分にはシャワリングを行い、油分除去を行う。最後にすすぎ装置によるすすぎを行い、洗浄した土壌を回収するシステムとした。すすぎ工程では、すすぎ装置を設置し、分級後の土壌における油分濃度の均一化を図った。回収土壌の油分濃度を均一にすることは、微生物処理において、微生物活性も均一になると考えられる。さらに、予備実験で効果のあったばっ気装置を設置した。写真- 2 にシステム全景を示す。

表- 2 予備実験結果のまとめ

パラメータ	予備実験で得られた知見
攪拌時間	2分程度で漸近
攪拌速度	150～300rpm 程度が最適
固液比	1：1 程度で漸近
初期油分濃度	初期濃度によらず除去率はほぼ同程度
水温	高温になるほど除去率は上昇
洗浄回数	多いほど除去率は上昇
ばっ気	機械攪拌との併用により除去率は上昇

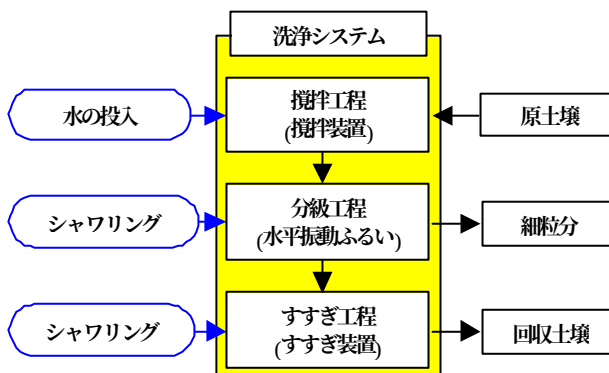


図- 8 システムフロー



写真- 2 システム全景

(3) 実験方法

a) 汚染土壌の性状

実証実験に使用した実汚染土壌の平均油分濃度は14,000mg/kg程度であり、アスファルト合材工場跡地のものである。図- 9に汚染土壌の粒径加積曲線を示す。細粒分含有率(粒径75 μ m以下)は20%程度、含水比は22%程度の土壌であり、油槽所やガソリンスタンドにおける油汚染土壌に比べ、細粒分の多いものであった⁵⁾。写真- 3に実汚染土壌の状況を示す。

b) パラメータ

予備実験の結果を受け、実証実験でのパラメータを表- 3のように設定した。また予備実験で多少効果の見られた洗浄水にアルカリ水を使う、アルカリ洗浄についても実施した。

c) サンプルング位置

各試験ケースでのサンプルング位置は、「原土壌」、「攪拌工程後の土壌」、「すすぎ工程後の土壌」の3点とし、それぞれを「原土壌」、「攪拌後」、「回収土壌」と称した。

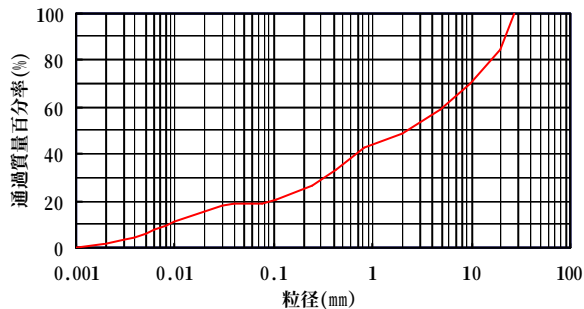


図- 9 実汚染土壌の粒径加積曲線



写真- 3 実汚染土壌

表- 3 試験ケース及びパラメータ

Case	攪拌時間 (min)	固液比 (1:X)	洗浄回数 (回)	アルカリ 洗浄
A	1	1.0	1	—
B	2	1.0	1	—
C	4	1.0	1	—
D	2	0.5	1	—
E	2	1.5	1	—
F	2	1.0	2	—
G	2	1.0	1	pH13

d) 分析方法

実現場での施工管理を速やかに行うため、また今回の実験ではパラメータの設定変更を速やかに行うことを目的として簡易分析を実施した。

簡易分析は、現場で分析可能で、かつ特殊な技能を必要としない分析方法であることとして、S-316赤外吸光光度法を採用した。分析装置を写真- 4に示す。この方法を採用することにより、実験を行った翌日には土壌の油分濃度がある程度把握できることになった。

(4) 試験結果

パラメータごとの実証試験結果を下記に示す。

a) 回収土壌の油分濃度

Case A～Eにおいてサンプルングした土壌の油分濃度を図- 10に示す。

原土壌の油分濃度はバラついており、図のように12,000～17,000mg/kgと最大値で最小値の約1.5倍となっているが、回収土壌ではほぼ3,000mg/kgと同程度の濃度となった。これは予備実験(図- 4)と異なった結果となっているが、実証実験では比較的低濃度の土壌であったため、このような現象が起こったと考えられる。

油分除去率としては75～82%となり、予備実験結果と比較すると、同等あるいはそれ以上の洗浄効果があることがわかった。



写真- 4 簡易分析装置

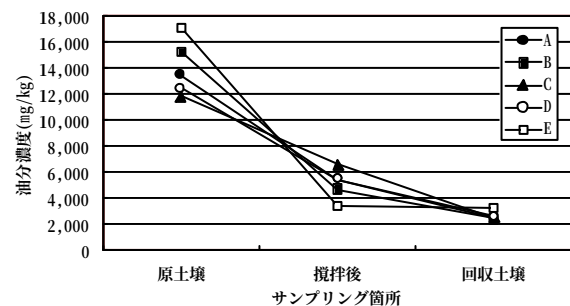


図- 10 回収土壌の油分濃度

b) 攪拌時間

攪拌時間をパラメータとしたCase A,B,Cにおいてサンプリングした土壌の油分除去率を図- 11に示す。攪拌後の結果では、1～2分の攪拌により60～70%であるのに対し、4分の攪拌では44%と低い油分除去率となった。これは剥離した油分の土粒子への再付着等が起こったためと考えられる。予備実験では2分の攪拌を超えると油分除去率がほぼ変化しないという結果を得ていることから、最適な攪拌時間は2分程度だと考えられる。

一方、回収土壌の油分除去率は80%程度であり、攪拌時間に係わらず、分級・すすぎにより安定した油分除去率となることがわかった。

c) 固液比

固液比をパラメータとしたCase B,D,Eにおいてサンプリングした土壌の油分除去率を図- 12に示す。攪拌後の結果を見ると水量を増加させることにより油分除去率も大きくなっている。

予備実験では固液比1:1以上では油分除去率が変化しないという結果であったことから、傾向が多少異なっている。

一方、回収土壌の結果では、攪拌時間をパラメータとしたケースと同様に、分級・すすぎにより固液比が異なってもほぼ同程度の油分除去率になった。以上のことから、固液比は1:1程度で十分であることがわかった。

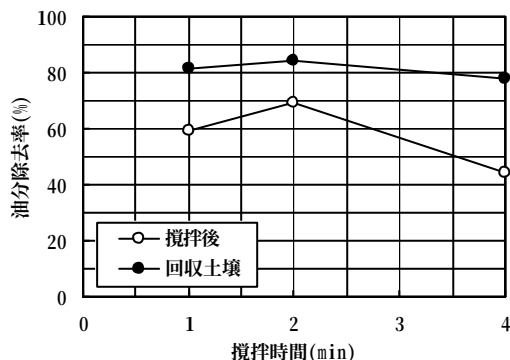


図- 11 攪拌時間の違いによる除去率

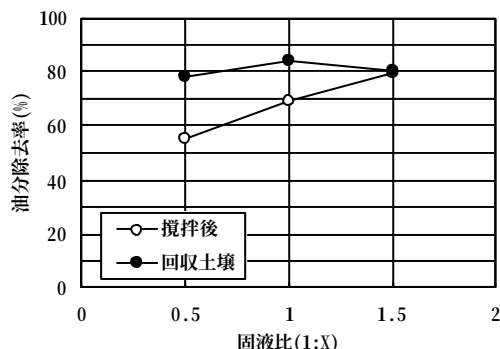


図- 12 固液比の違いによる除去率

d) 洗浄回数

洗浄回数をパラメータとしたCase Fにおける油分除去率を図- 13に示す。洗浄回数を増加させることにより、多少油分除去率も高くなったが、それほど大きな効果は見られなかった。

e) アルカリ洗浄

アルカリ洗浄と通常の洗浄結果を図- 14に示す。アルカリ洗浄による効果は多少見られたが、予備実験とほぼ同程度の効果であった。

f) 試験結果のまとめ

これらの試験結果から得られた知見を整理し、表- 4に示す。

また、各工程での運転状況を写真- 5～写真- 8に示す。

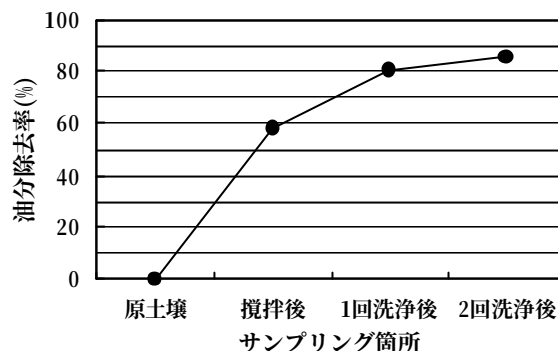


図- 13 洗浄回数と油分除去率

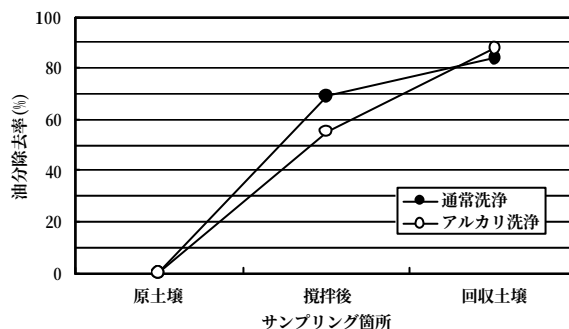


図- 14 アルカリ洗浄による効果

表- 4 実証実験結果のまとめ

パラメータ	得られた知見
油分濃度	80%程度の油分除去率
攪拌時間	2 分程度が良いが、すすぎ工程後の油分除去率はほぼ一定
固液比	1:1.5 で最も効果が見られたが、すすぎ工程後の油分除去率はほぼ一定
洗浄回数	多少の効果あり
アルカリ洗浄	多少の効果あり

5. 予備実験と実証実験の比較

予備実験では、実証実験で使用した実汚染土壌を用いた実験も実施したことから、そのデータとの比較を行った。表- 5に比較した実験ケースを、図- 15に比較した結果を示す。なお、実証実験でのサンプリングは攪拌後のものである。

比較対照ケースが2ケースしか無いが、どちらの結果も予備実験の油分除去率が実証実験での値を下回る結果となった。言い換えれば、今回実施した予備実験を行うことにより、プラントでの浄化の最低ラインをある程度把握できることを示している。

6. まとめ

本実験により、油汚染土壌を対象とした土壌洗浄法（ミキシング・ソイルウォッシャ）では、ミキサ等の強制攪拌により原土壌中の油分を60%以上低減できることがわかった。また、すすぎ後の油分除去率は攪拌時間、固液比の違いによらず70～80%程度となることがわかった。回収土壌の油分が3,000mg/kg程度の濃度になること、ならびにすすぎにより油分濃度が均一化することは微生物処理を行う上で重要であり、本システムが油汚染土壌の微生物処理に対する一次処理として有効であることがわかった。

また、小型の攪拌機を用いた簡易な実験により、洗浄プラントでの洗浄効果の推定がある程度可能であることがわかった。

なお、本研究開発は前田建設工業㈱、日立造船㈱、東洋建設㈱との共同研究の一貫として実施したものである。ここで関係各位に謝意を表します。



写真- 5 攪拌工程



写真- 6 水平振動ふるいでの洗浄・分級

参考文献

- 1) 社団法人土壌環境センター：油による土壌・地下水汚染の調査・対策技術, pp.1-14, 2001.
- 2) 田淵, 川上ほか：重金属で汚染された土壌の分級洗浄処理とリサイクル, 資源と素材, Vol.113, pp.1115-1120, 1997.
- 3) 公害防止の技術と法規編集委員会：公害防止の技術と法規[大気編], 産業公害防止協会, pp.209-210, 1985.
- 4) 深津, 浜野ほか：油汚染土の洗浄処理に関する基礎的検討, 第9回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, pp.256-257, 2003.
- 5) 佐伯, 安部ほか：実油汚染土壌を用いた土壌洗浄実験, 第9回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, pp.258-259, 2003.



写真- 7 すすぎ工程



写真- 8 回収土壌（洗浄後の土壌）

表- 5 比較ケース

Case	固液比 (1:X)	攪拌時間 (min)
X	1	2
Y	1	1

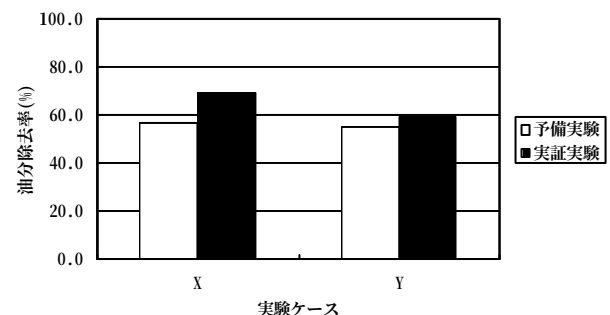


図- 15 予備実験と実証実験の比較