

界面活性剤分解菌を用いた洗濯排水リサイクルシステムの開発

Research of Recycling Machine for Cleaning Drainage
with Microorganisms that Degrade Detergents

技術本部 杉山茂広*¹ 服部敏夫*²
澤井秀樹*³
産業機器事業部 上田敦士*⁴ 蒔田伸二*⁵

リネンサプライ業では、地下水の取水制限、河川・海洋汚染防止等の地球環境保全の観点から、業界の方針として節水に取組み、界面活性剤を含む洗濯排水再利用のニーズが高まってきている。当社は、そのニーズにこたえるため、当該洗濯排水性状に適合した界面活性剤高速分解菌 SD 21 株を選定した。この SD 21 株を含んだ界面活性剤分解菌群を高濃度で槽内に保持するために微生物担体、精密濾過膜を組込んだ、バイオリアクタ構造の採用により、装置のコンパクト化を図った洗濯排水リサイクルシステムの開発に着手した。本報では、その特徴と開発状況を紹介する。

The need for water recycle has grown to save water in environmental protection including restriction on the use of subterranean water and prevention of river and sea pollution, as suggested by the Japan Linen Supply Association, which sought a recycling machine for cleaning up drainage including nonionic surfactants with low biodegradability. We developed a SD21 strain that degrades nonionic surfactants easily and uses nonionic surfactants as the sole carbon source. We developed recycling machine that maintains a high concentration of SD21 strain in the bioreactor using media-added activated sludge process and microfiltration. We introduce the features and examples of pilot plant use for the recycling machine.

1. はじめに

水は限りある資源であることから、多量の水を使ってシーツ、タオル、浴衣などのリネンを大量に洗濯処理するリネンサプライ業にとって、良質な水の確保、効率的な利用は重要な課題の一つである。リネン洗濯プラントにおける取水、排水は図1に示す組合せが考えられる。最近、特に都市部において地下水の取水が制限され、地球環境保全の観点より、排

水を河川放流から下水道利用へ切替えるよう行政指導されるなど、取水は上水から、排水は下水道に、というケースが増えている。また、節水対策としても節水のニーズは大きく、さらに、河川・海洋汚染防止の見地からも排水量削減のニーズが急速に高まっている。

上記ニーズにこたえて、当社は“水洗機からの排水は自ら処理し、リサイクルする”をコンセプトに掲げ、洗浄プロセスの構築を目的に技術課題である難分解性の非イオン系界面活性剤ポリオキシエチレンアルキルフェニルエーテル（以下、APEと称す）を分解できる高効率・コンパクトな排水リサイクルシステムの開発に着手した。この界面活性剤を含む排水をリサイクルするには、この物質を分解して、再利用可能な水質にする必要がある。筆者らは、この技術課題に対して、APEを分解する微生物の機能を利用することに着目した。

2. 界面活性剤分解菌の選定

生分解性が低いAPE⁽¹⁾を生物により高度に処理することを目的として、優れた分解能力を持つ微生物を探索・単離した。

2.1 スクリーニング

APEの分解能力に優れた微生物を探索するために、微生物源として多様な微生物群を含むと考えられる活性汚泥を用いた。スクリーニング培地は、炭素源としてAPEのみを添加した。探索には、培地のAPEと反応して着色する特性を持つ試薬を用いてAPEの資化性を判断する方法を用いた⁽²⁾。

上記方法から得られた200余りの単離株から、APE含有培地において最も増殖能が高い株を界面活性剤高速分解菌として選定し、SD 21株と命名した。

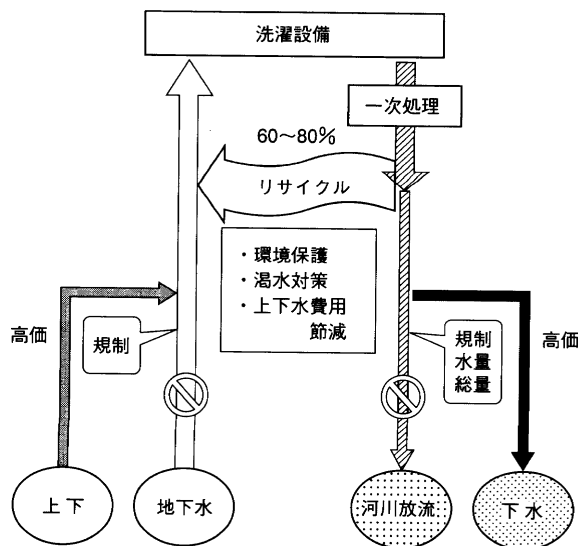


図1 リネンプラントの取水、排水形態 地下水の取水制限、下水設備の使用指導等から、高価だが上水から取水し、下水に排出するケースが増加している。
Water supply and drainage in linen plant

*1 名古屋研究所産器・エンジン研究室

*4 産器技術部食品包装機械設計課主席

*2 名古屋研究所産器・エンジン研究室主席

*5 産器技術部食品包装機械設計課

*3 基盤技術研究所反応工学研究室

表1 *Pseudomonas putida* SD 21 の細菌学的諸性質
Morphological and biochemical characteristics of *Pseudomonas putida* SD 21

(A) 形態的性質	(B) 生理的性質	(C) 資化性
形態：短桿菌 グラム染色性：陰性 胞子形成能：なし 運動性：あり 酸素に対する態度：好気性 オキシダーゼ：陽性 カターラーゼ：陽性 OF (Oxidation-Fermentation) : O (好気性) 蛍光色素の生成：あり	硝酸の還元：陽性 インドールの生成：陰性 グルコースの発酵性：陰性 アルギニンジヒドラーゼ：陽性 ウレアーゼ：陰性 ゼラチンの液化：陰性 β-ガラクトシダーゼ：陰性 オキシダーゼ：陽性	グルコース：陽性 L-アラビノース：陰性 D-マンノース：陽性 D-マンニトール：陰性 N-アセチル-D-グルコサミン：陰性 マルトース：陰性 グルコン酸カリウム：陽性 n-カプリン酸：陽性 アジピン酸：陰性 dl-リンゴ酸：陽性 クエン酸ナトリウム：陽性 酢酸フェニル：陽性 ソルビトール：陽性 ビルビン酸ナトリウム：陽性

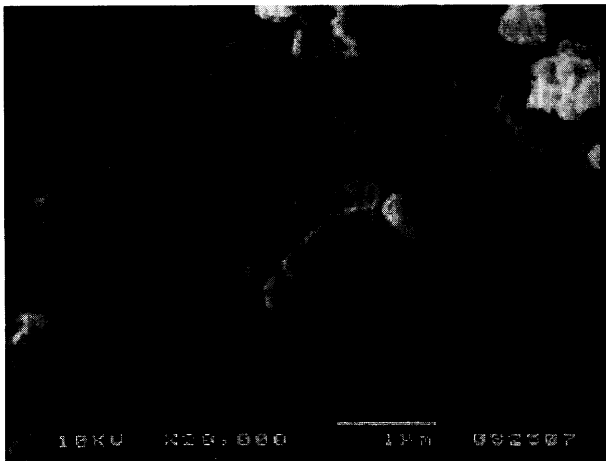


図2 *Pseudomonas putida* SD 21 の形態 当社が単離・特許化に成功した SD 21 株の走査型電子顕微鏡写真を示す。大きさ約 1 μm の桿菌である。
Morphology of bacterial isolate SD 21

2.2 SD 21 株の同定とその諸性質

選定した SD 21 株の細菌学的性質は、図 2 に示すように長さ 1 μm 程度のかん(桿)菌であり、表 1 に示す性質を持つことから、SD 21 株は *Pseudomonas putida* に分類される細菌であると同定した (工業技術院生命工学工業技術研究所寄託菌)。

図 3 に SD 21 株による APE の分解及びそれに伴う SD 21 株の増殖特性を示す。APE の分解性は、コバルトチオシアン酸アンモニウム吸光度法 (CTAS 法)⁽³⁾ を用いて評価した。SD 21 株濃度は分光光度計による吸光度で測定した。炭素源として APE だけを入れた培地で育つ SD 21 株は、培地中の APE を検出限界以下にまで分解し (図 3 参照)、それを唯一の炭素源として増殖できることを確認した。

また、SD 21 株の APE 分解活性は、グルコース、クエン酸ナトリウム等を基質として培養すると低下し、その菌体を再び APE 存在条件下に置くと、分解活性が回復する性質を持つことを確認している。すなわち、SD 21 株の APE 分解活性は、APE の存在により誘導的に発現する調節が行われていると考えられる⁽⁴⁾。この性質を後で述べる SD 21 株の大量培養に利用

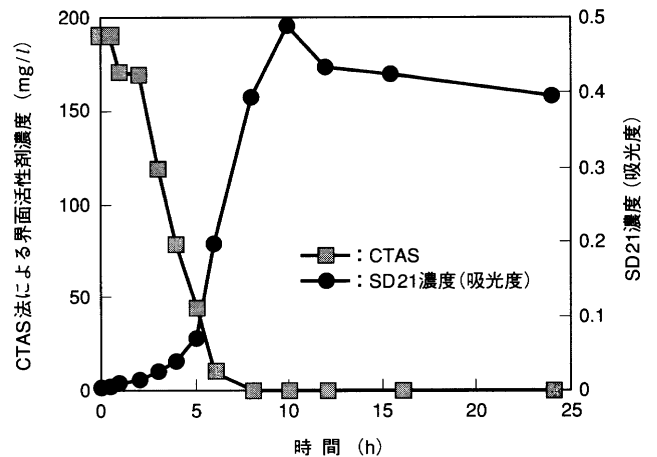


図3 SD 21 株の APE 分解特性と菌体増殖 SD 21 株は、培地中の APE を検出限界以下にまで分解し、それを唯一炭素源として増殖することが分かる。
Time course of APE degradation as growth substrates for SD 21

した。

2.3 菌体供給法の検討

排水リサイクル装置の立ち上げ時に際し、一般の活性汚泥では界面活性剤分解能力が低く、排水に含まれる界面活性剤による発泡等の不具合が予想される⁽⁵⁾。このとき、界面活性剤分解能力の優れた SD 21 株を投入することで APE 分解活性が高められ、不具合なく装置を立ち上げることができると考えられる。そこで、立ち上げ時に必要な菌体供給を行うために、SD 21 株を効率良く大量に生産する方法を検討した。

APE 分解活性能力の優れた SD 21 株を生産するためには、基質として APE を用いて培養することが望ましい。しかし、APE で通常の微生物のように通気培養を行うことは、APE 起因の著しい発泡のため、困難である。

そこで、APE 分解活性が誘導されて発現する SD 21 株の性質を利用し、図 4 に示す大量培養法を構築した。

すなわち、ジャーファメンタを用い、培養菌体をクエン酸ナトリウム培地で回分培養後、APE を添加して、APE 分解活性を導く。その後遠心分離により集菌し、APE を分解可能な SD 21 株を得ることができる。

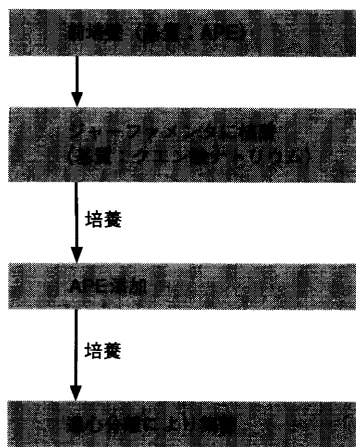


図4 大量培養手順 クエン酸ナトリウムで培養後、APEを添加し、APE分解活性の高い菌体を大量に生産可能である。
Schematic flow of culture for producing in large quantities of SD 21

しかし、本方法では、100 t/d以上の排水を処理するために必要な菌体量を確保するには、コストや時間を必要とする。そこで、さらに大量培養する手段として前述方法で培養したSD 21株と活性汚泥を混合した界面活性剤分解菌群を用いスケールアップしながらフィールドテストを実施した。今後、生産機レベルでのSD 21株供給は、テスト機から分配が可能であると考えられる。

3. システムの特徴

最初に、本システムの心臓部であるバイオリアクタ部（以下、リアクタ部と称す）について説明する。

リアクタ部は、界面活性剤分解菌群を用い、排水中に含まれる界面活性剤などの有機物を主に分解除去する役目を担うものである。

界面活性剤分解菌群は、負荷（汚れ成分量）、温度、溶存酸素量、pHなどの環境を最適条件に制御した場合、菌群濃度に比例して排水の分解能力を向上できることを実験室レベルで確認している。リアクタ部では、微生物担体と精密濾過膜（以下、MF膜と称す）を設置し、界面活性剤分解菌群の高濃度化を図った。微生物担体には、表面に界面活性剤分解菌群を付着させ高濃度に保持できる効果がある。またMF膜には、そのポアサイズがSD 21株を始めとする界面活性剤分解菌群の大きさより細かな約 $0.25\mu\text{m}$ であるため、菌群の流出を防ぎ、リアクタ内で排水に含まれる有機物を分解除去した処理水と菌群を分離する効果がある。

以上により、従来の回分式活性汚泥システムのように活性汚泥を沈降させて処理水と分離する必要がなく、リアクタ内に界面活性剤分解菌群を高濃度に保持することで、従来法に比べ容積比約1/10のコンパクト化を実現した。また本システムはユニット構造を採用しているため、土木工事が不要で据付けが容易である。さらに、システム立ち上げ時には、SD 21株を含んだ界面活性剤分解菌群を高濃度で投入することによ

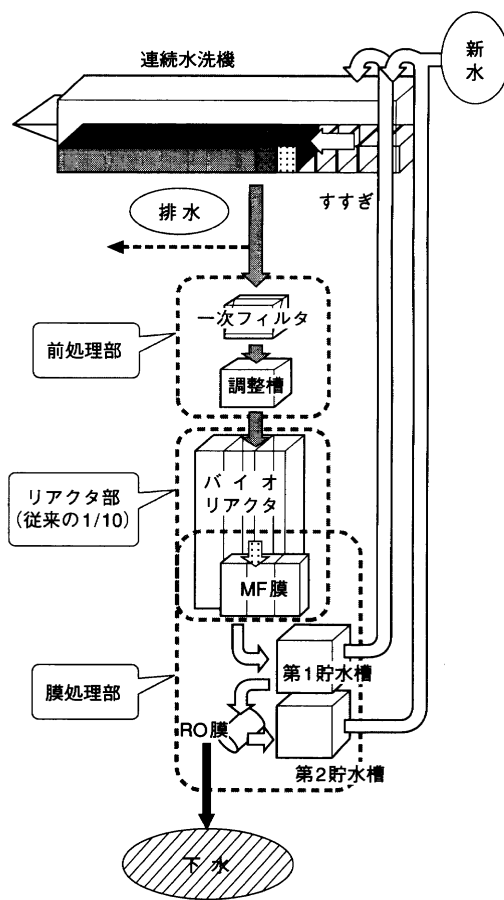


図5 排水リサイクルシステムのフロー 前処理部、リアクタ部、膜処理部から構成される。リサイクル水質は、導電率で管理するため、自動運転可能である。
Schematic flow of recycling system for cleaning drainage

って高い負荷から馴（じゅん）致でき、1箇月に満たない短期間で定格性能に達するめどを得ている。

図5は、前記特徴を盛り込んだ排水リサイクルシステムのフローを示したものである。

図5中の連続水洗機から排出された排水は前処理部に送られ、一次フィルタによりリントなどの大型固形汚れを除去し、必要に応じてpH調整などを行った後、リアクタ部に送られる。リアクタ部では、界面活性剤などを含む排水中の有機物が界面活性剤分解菌群の活性により二酸化炭素と水に分解される。この結果、汚れ成分の指標となる化学的酸素要求量（COD）は 10mg/l 以下となり、後述する無機塩類の除去を目的としたオプション仕様の逆浸透膜（以下、RO膜と称す）の供給水質基準を満たすこととなる。また、界面活性剤分解菌群に分解処理された水（以下、バイオ処理水と称す）は前述のようにMF膜を通して濾過されるため、微細な粒子汚れもすべて除去された清澄な状態のものが得られる。

しかし、このバイオ処理水には、微生物では分解除去不可能な無機塩類を含んでいる。バイオ処理水に含まれるこの無機塩類は洗濯時に添加される助剤に起因するものであり、陽イオンとしてはアルカリ金属イオンが主である。この陽イオンが多く存在した状態で再利用され、洗濯に供せられると被

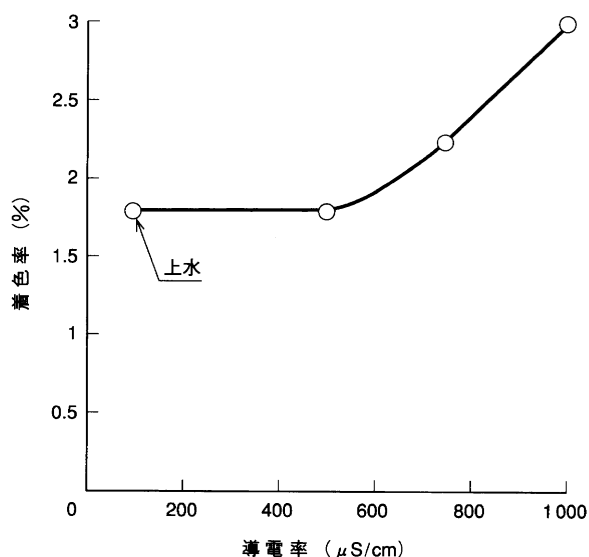


図6 リサイクル水質と着色率の関係 リサイクル水の導電率が大きいほどシーツの着色率が高い傾向を示す。すすぎ回数は100回とした。
Relationship between quality of recycling water and coloring clothes

洗物が着色する原因となる。なおアルカリ金属は、イオン化傾向が高いため、水中では、他のイオンと塩を形成し沈殿することはほとんどなく、リネン洗濯用水の再利用にとっては問題となる。

リサイクル水質が被洗物に与える影響を調べるため、バイオ処理水と上水の混合比率を変えた調合水の導電率と着色率の関係について検討した(図6参照)。なお、導電率は陽イオン濃度の尺度として用いたものである。着色率は、色彩色差計を用いて測定した白色度の変化率により定量化した。被洗物は、シーツ地の綿白布を用いた。シーツなどのリネンは、ホテルなどのユーザへ貸出し、使い終わった後、回収して洗濯後再度貸出するため、約100回程度繰り返し使用される。そのため、すすぎ繰り返し回数を100回とした。このすすぎとは、被洗物をリサイクル水に浸漬し、アイロンによる乾燥を行う一連の操作を指す。

図6から、リサイクル水の導電率が大きいほど着色率は高くなる傾向を示し、リサイクル水を導電率500 μ S/cm以下に管理すれば従来の上水と同等の着色率、すなわち洗浄品質を得られることが分かった。またそもそも着色率とは、白布が

どの程度黄ばむ(黄変)かを表したものであるかを考え、通常の見視観察では、3%が判定限界とされていることを考慮すると、導電率1000 μ S/cmレベルでも実用は可能であると考えられる。

以上から、リサイクル水の水質管理基準として導電率を使用できることが確認できるとともに、黄ばみをおこさせないためにはMF膜では除去できない無機塩類の濃度を一定値以下でリサイクルする必要があることが分かった。その方法として、①バイオ処理水から無機塩類を除去する、②無機塩類の少ない水を選択的に利用し、さらに上水で希釈する、などが挙げられる。前者の場合、システムのオプションとしてRO膜を設置することで上水以上の純水が得られる。後者の場合は、水洗機からの排水中で無機塩類の含有量が少ないすすぎ水を分別回収し、主にリサイクルする方法がある。

各々のリサイクル率は、前者が高く、後者は前者と比較して若干低くなるが、設備コスト、運転コストを大幅に安くできるメリットがある。

4. ま と め

大切な資源である水を大量に用いるリネンサプライ業からの地球環境保全、資源リサイクルニーズにこたえ、下記を特徴とする洗濯排水リサイクルシステムを研究した。

- (1) 微生物担体及びMF膜を使い、当社独自の界面活性剤高速分解菌SD21株を含む界面活性剤分解菌群を高濃度に槽内に保持するバイオリアクタ構造の採用で、従来の回分式活性汚泥システムに比べ約1/10のコンパクトな排水リサイクル装置を得た。
- (2) 独自(業界初)の導電率を用いたリサイクル水質の管理方法を採用し、低コストなりサイクルシステムを構築した。

参 考 文 献

- (1) 中村好伸, 非イオン性界面活性剤—歴史, 種類と性質, 用途, 水環境学会誌, 21 (1998) p.192~196
- (2) Cook, K. A., A rapid method for the detection of non-ionic surfactant-degrading micro-organisms. J. Appl. Bacteriol. 44 (1978) p.299-303
- (3) 合成洗剤の生分解度試験方法, 非イオン界面活性剤の定量法, JIS法K 3363-1990
- (4) 澤井ほか, 界面活性剤POEP資化性菌の単離とその諸性質, 1999年度日本農芸化学会大会要旨集 (1999) p.386
- (5) 和田ほか, 泡トラブルと消泡技術 (1983) p.64