

船舶機関室ビルジの生物処理装置の開発

Development of Bio-Treatment System of Oily Bilge Drained from Ship Engine Room

技術本部 中村 宏^{*1} 小川 尚樹^{*2}

田畑 雅之^{*3}

神戸造船所 財津 融^{*4}

高菱エンジニアリング株式会社 平田 俊雄^{*5}

海洋環境を守るため、船舶から排出されるビルジ排水においても条約による規制が設けられた。しかし、本排水中には洗剤で乳化したエマルジョン油が含まれており、従来法では処理が困難であった。そこで、筆者らはこのビルジ排水の全く新しい処理法としてバイオ技術に着目し、鉱物油を分解する能力を持つ微生物を利用したビルジ処理システムを開発して、実船搭載試験においてその性能を確認した。本システムは、従来処理の困難であった乳化油を特殊微生物の作用で高効率で分解処理することができ、低ランニングコスト、省メンテナンスを特徴とする。

We aimed to develop a system for treating emulsified oil discharged from ship's engine rooms. The efficiency of the targeted system was to reduce the oil content of the drain to 15 ppm or less so that the drain could be discharged into the sea. We have succeeded in developing a biological treatment system using a fluidized bed in which the drain and sludge are efficiently mixed by aeration and stirring. A specific sludge with enhanced oil decomposing ability is used in the system. We performed shipboard tests using a pilot test system, the capacity of the reaction chamber of which is 0.5 m³ and oil volume load, 0.4kg-oil/(m³·d), and have confirmed future possible applications to the treatment system for ships. This would bring great reduction in the load on existing oil separators, saving its overall maintenance cost.

1. はじめに

地球環境保全の観点から船舶から排出されるビルジ排水においても、海洋汚染防止条約(MAPOL条約)における国際的な規制が設けられ、船舶内での油分処理が義務付けられるようになった。しかし、ビルジ排水中には洗剤と乳化したエマルジョン油が含まれおり、その有効な処理方法が求められている。

現在、実船に搭載されているビルジ処理方式は遠心分離器(コアレッサタイプ)による油水分離方式が主体である。油水分離方式では、いったんビルジタンクに貯留されたビルジは、ポンプで遠心分離器へ送液され、油水分離された濃縮油分は分離油タンクへ返送され、ろ過された水は放流される。ただし、ろ過水は放流前にビルジアラームによりモニタリングされており、MAPOL条約⁽¹⁾で規定された放流規制値(油分 15 ppm 以下)を満たさない場合は、自動的にバルブが切換えられビルジタンクへ返送されるというものである。本システムは原理的にも簡単に操作も容易に感じられるが、実際には次のような問題点がある。

- (1) 油分によるコアレッサエレメントの目詰まりが起りやすく清掃頻度が高い。
- (2) ビルジには洗剤で乳化した油分が数百 ppm 相当含まれているが、コアレッサエレメントでは乳化油の除去が困難である。そこで我々は鉱物油を分解する能力を持つ微生物に着目し、その機能を利用した安価で簡便なビルジ処理方式の開発を行った。

2. 生物処理方式によるビルジ排水処理

2.1 新規重油分解微生物の獲得

微生物が石油等の炭化水素を分解、利用することはかなり昔から知られている。“Petroleum Microbiology”⁽²⁾中の年表の中に

1895 年に三好らによって初めて学術的にカビ類による炭化水素の分解が報告されて以来、芳香族炭化水素や高級炭化水素の分解等、様々な発見・研究が行われてきている。また、1960 年代から 1970 年代にかけては将来の食料不足に備え、石油で酵母を育てて石油たんぱくとして利用する技術の開発⁽³⁾が盛んに行われた。これも石油を分解してたんぱく質(菌体)を合成する微生物の力を利用したものである。

近年では、環境浄化の観点から石油・原油分解微生物に関する研究が活発に行われている。藤田ら⁽⁴⁾は沿岸の浮遊原油から原油分解菌を分離し、*Pseudomonas* 属と同定した。田中ら⁽⁵⁾は原油の構造を模擬する種々のモデル物質を分解する微生物の分離に成功、それらの微生物の最適混合により原油を分解する試みに取り組んでいる。飯塚ら⁽⁶⁾は原油そのものを対象として分離した微生物(*Trichoderma* sp.)が 10 日間で原油中の芳香族成分の 45% を分解できると報告している。

表 1 重油分解菌単離用合成培地
Medium for oil-decomposing bacteria

人工海水(粉末)	10.5 g
A 重油	1.0 g
硫酸アンモニウム	0.2 g
硫酸マグネシウム	0.1 g
塩化カルシウム	2.0 mg
Fe-EDTA	2.0 mg
硫酸マンガン	2.0 mg
モリブデン酸ナトリウム	0.1 mg
ゼランガム	10.0 g
蒸留水	1 l
pH	7.2

*1 高砂研究所化学研究室主務 理博

*4 船舶・海洋部機装設計課

*2 高砂研究所化学研究室

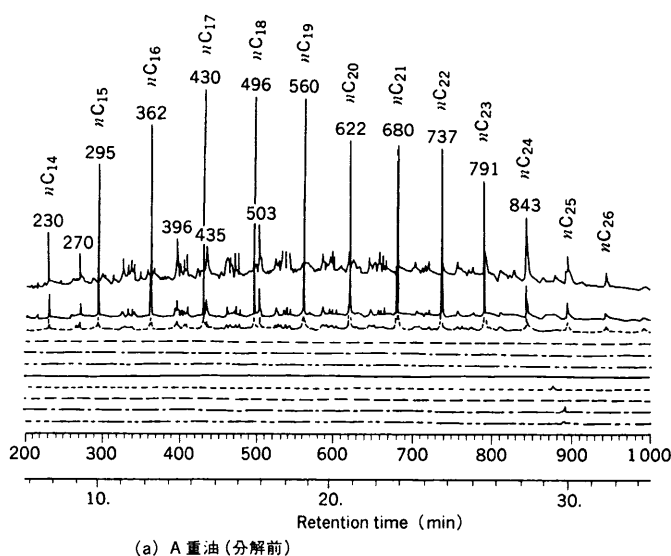
*5 機械実験部化学技術実験課

*3 基盤技術研究所バイオテクノロジー研究室

筆者らはビルジ中の油分の大半が重油であることを確認し、重油分解菌の分離を行い、集積培養を行っていた活性汚泥から重油分解菌 MTO-B 56 株、同 MTO-Y 77 株の単離に成功、それぞれ、*Corynebacterium* 属、*Debaryomyces* 属⁽⁷⁾と同定した。表1に重油分解菌単離用合成培地を、図1に *Corynebacterium* MTO-B 56 株の走査電子顕微鏡写真を示す。また、MTO-B 56 株は自ら界面活性剤を分泌、油との接触効率を高める特徴を有しており、A 重油の分解率は 60% に達する。図2は MTO-B 56 株の A 重油分解特性を示したものである。図2(a)が分解前の A 重油の GC-MS スペクトル、図2(b)が MTO-B 56 株で分解処理後のスペクトルである。MTO-B 56 株の分解によって炭素数 22 以下の炭化水素（油分）が分解除去されていることが分かる。また、本菌では炭素数 23 以上の炭化水素や炭素数がそれ以下でも側鎖を有する炭化水素は分解困難であることを示している。重油のように多成分混合物では単一菌による完全分解は難しく、各種微生物の混合系による処理が適していると考えられる。ただし、十分な処理



図1 重油分解菌 *Corynebacterium* MTO-B 56 株 活性汚泥より単離した *Corynebacterium* MTO-B 56 株の走査電子顕微鏡写真、長径約 2 μm の桿菌(かんきん)である。
Electromicrograph of oil decomposing bacterium, *Corynebacterium* MTO-B 56



(a) A 重油 (分解前)

能力を得るためには、MTO-B 56 株のように油分解のキーとなる微生物を 1 株以上含んでいることが必要である。

2.2 ビルジ処理パイロット試験

MTO-B 56 株を含有した油分解活性汚泥を使用した実機サイズ（反応部容積 500 l、処理量 2 m³/d）のパイロット装置を製作した。

本パイロット装置の基本コンセプトは次のとおりである。

- (1) 船の動揺を考慮してリアクタ内に揺れ防止対策のための仕切せきを設置した。また、リアクタ液面が一定レベル以上になると運転が一時自動的に停止するようにした。
- (2) 乗組員の手間にならないように、メンテナンスフリーで全自動運転が可能であるようにした。

本パイロット装置のフローを図3に示す。本装置におけるビルジ処理の手順を以下に示す。

- (1) ビルジタンクからビルジ排水がバイオリアクタに供給される。同時に、栄養剤タンクからリアクタへ栄養剤が供給される。
- (2) リアクタにはエアが供給され、内部の砂に付着した微生物とビルジ排水が接触、油分が好氣的に分解される。
- (3) 処理水はリアクタ内の沈殿部で固液分離され、オーバーフローして処理水槽に貯留される。

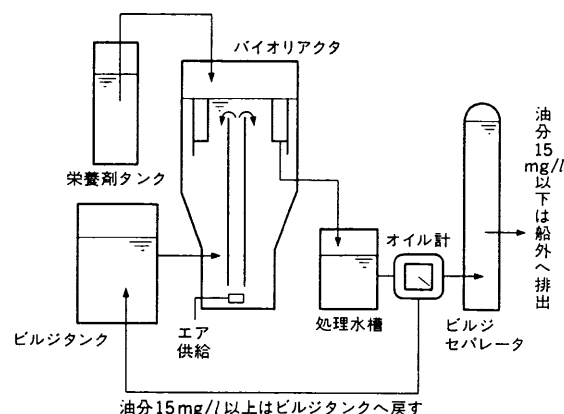
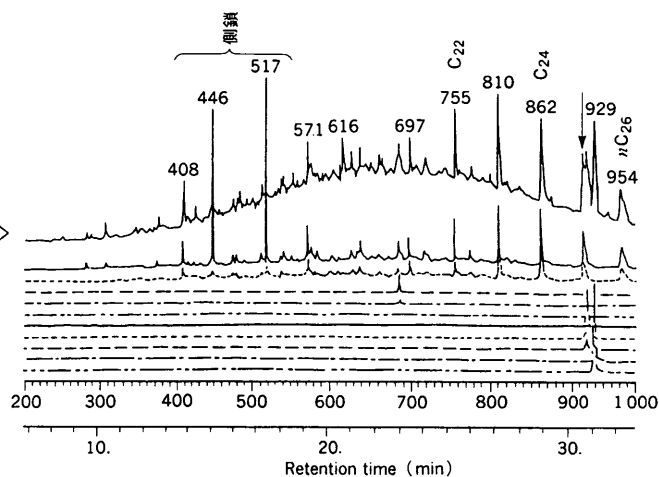


図3 パイロット試験装置フロー バイオリアクタ内に重油分解菌を含んだ活性汚泥が砂に付着した状態で流動している。
Flowsheet of pilot scale bioreactor



(b) MTO-B 56 株分解後

図2 MTO-B 56 株の A 重油分解特性 (GC-MS スペクトル) *Corynebacterium* MTO-B 56 株は炭素数 22 以下の炭化水素を分解していることが分かる。
GC-MS spectra of A-heavy oil treated by *Corynebacterium* MTO-B 56 (a) before treated, (b) after treated

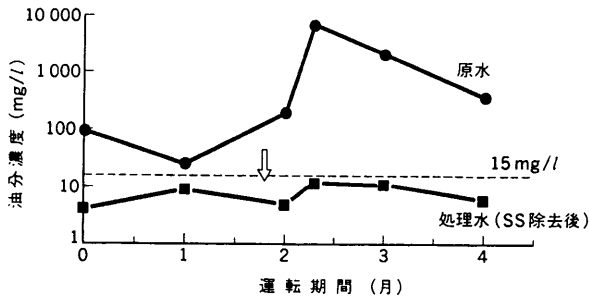


図4 実船搭載試験結果 流入水中の油分濃度の大きな変動にもかかわらず、処理水中の油分濃度は放流規制値の15 ppm以下を常にクリアしている。
Oil concentration of bilge water treated with bioreactor

表2 製品仕様
Particulars list of equipment

名称	型式	MBIO-2	MBIO-5	MBIO-10
バイオリアクタ	形式	流動床式生物処理		
	容 積	550 l	1 400 l	2 800 l
	処理能力	2 m ³ /d	5 m ³ /d	10 m ³ /d
加圧タンク		10 l	20 l	30 l (飽和タンク)
浮上タンク		300 l	500 l	700 l
処理水タンク		400 l	750 l	1 000 l
栄養剤タンク		5 l	10 l	20 l
処理タンク内 MF スクリーン		中空糸膜		
計装パネル		ポンプスタータ、発停ボタン、ランニング表示灯		

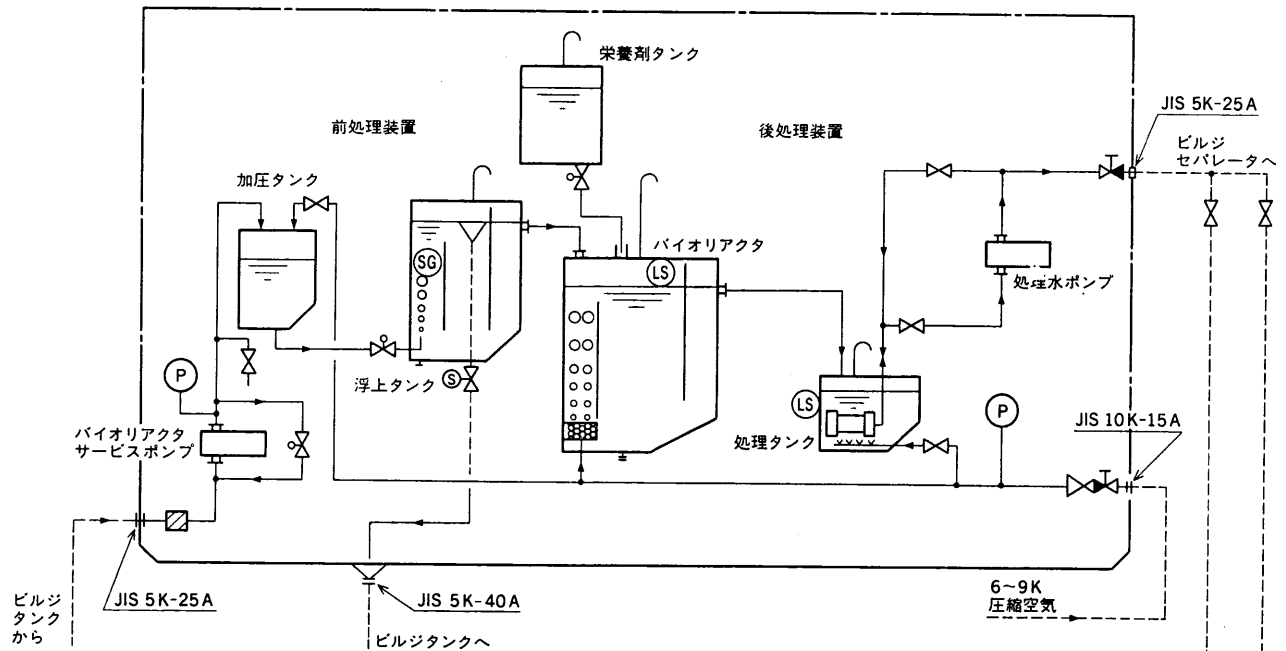


図5 機関室ビルジ生物処理装置フロー 実船搭載試験結果を踏まえ、バイオリアクタの前後に加圧浮上装置、膜分離装置を設けた。
Flowsheet of biological bilge treatment system

(4) 処理水は油分計で油分濃度が計測される。油分濃度が15 ppm 以下の場合、処理水はビルジセパレータを経て船外へ排出される。15 ppm 以上の場合はビルジタンクへ戻される。

上記パイロット装置を当社新造船(8 000 トン)に搭載し、処理性能を確認した実船搭載試験の結果を図4に示す。

本実船搭載試験を通して次のことが明らかとなった。

- (1) バイオリアクタに流入した原水の油分濃度に大きな変動があったにもかかわらず、試験期間中の処理水油分濃度は放流規制値の15 ppm 以下を満足することが確認できた。
- (2) 流入原水中の油分濃度の変動は船の揺動による浮上油の大量流入が原因であることが分かった。
- (3) リアクタ内の微生物は運転期間中十分に機能を発揮していたが、実船に搭載されている油分計は水中懸濁物を油分として計測するため、流入原水中の懸濁物あるいは、漏出した微生物の影響で、油分計の指示値は15 ppm を超える場面が見られた。
- (4) このため、バイオリアクタから漏出する懸濁物をフィルタで除去したところ船搭載油分計の指示値が15 ppm を超えることがなくなり、規制値を完全にクリアすることが可能となった。

上記、実船搭載試験から得られた知見を基に実装置には次のような改良を加えた。

(1) 揺動による浮上油の大量流入を避けるため、加圧浮上分離による前処理槽を設けた。これにより、バイオリアクタに供給される原水の油分濃度が安定し、生物処理性も安定する。

(2) 万一、船の動揺で油分活性汚泥を付着させた砂がオーバーフローしたときのために、処理水は中空糸膜を通して最終的に排出するようにした。

(3) 設置スペースを考慮して、前処理槽/バイオリアクタ/後処理槽のユニット化を図った。

以上の点を考慮して装置仕様を決定し、ビルジ生物処理システムを完成した。

3. 機関室ビルジ生物処理システム

3.1 システム概要

船内で発生するビルジの量が船の大きさによって異なることは当然である。本来船の艤装は受注生産であるが、コストダウンのために標準化を図り、船の大きさによってビルジ発生量を見極め、型番を選定できるようにした。製品仕様を表2に、システムフローを図5に、装置外観を図6に示した。種々のビルジ発生量に対応するため処理能力2 m³/d、5 m³/d、10 m³/dの3タイプを用意した。

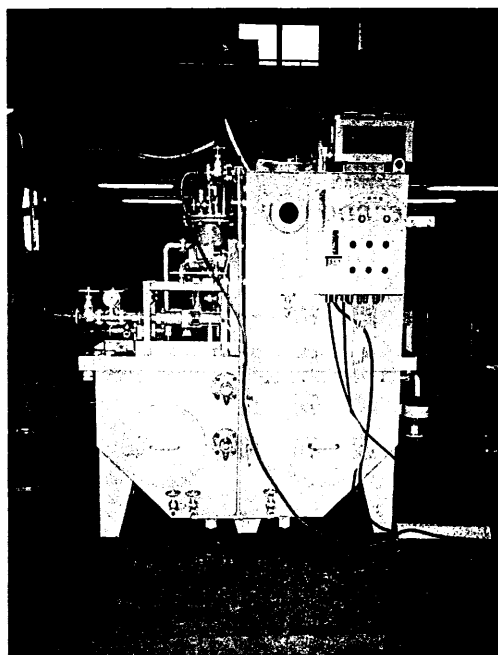


図6 装置外観 型式 MBIO-2 の装置外観写真。
Photograph of bilge treatment bioreactor

本システムにおけるビルジ処理の手順を以下に概説する。

ビルジ取水口は浮上油の流入を避けるためにビルジタンク下部に設置されている。ビルジタンク内のビルジはバイオリアクタサービスポンプによって吸い上げられ、加圧タンクへ導入される。

加圧タンクへは船内雑用圧縮空気系統からの圧縮空気が吹込まれ、内部圧約3~3.5気圧に加圧される。加圧タンクを出た水は浮上タンクへ入るが、この時急激に大気圧にまで減圧されるので、溶存した空気が微細な気泡となって放散する。その気泡が油分に付着し油分の浮上を促進し、油水分離が起こる。浮上した油分は一定時間ごとに引き抜かれ、ビルジ分離油タンクへ返送される。

浮上分離後の水に含まれる油分は数百ppmではば一定値を示す。この水は浮上槽の底部から引き抜かれバイオリアクタへ導かれる。

バイオリアクタは流動床タイプで、その内部には砂に付着させた油分解活性汚泥が充てんされている。バイオリアクタ内には、汚泥が付着した砂を流動させるため及び固液分離のために仕切りが設けられている。リアクタ内は、ばっ気により上下流を発生させ砂の流動性を高めている。浮上分離を終えたビルジはバイオリアクタの流動部分に入り、汚泥と接触しながら、油分が分解処理されていくとともに、オーバーフローした水が後処理装置へと流れていく。また、バイオリアクタへは、栄養剤が一定速度で添加されるようになっており、これによってリアクタ内の油分解活性が高活性に維持される。

後処理装置とはバイオリアクタから流出した懸濁物を除去する装置であり、中空糸膜によるろ過を行っている。後処理槽を通過した処理水はビルジセパレータへ送られる。なお、後処理槽内には中空糸膜への懸濁物の付着による機能低下を防止するため、散気板を設け膜を揺動させている。

3.2 メンテナンス

通常航行時の本装置の管理項目は空気供給量、栄養剤液量、微生物量の確認程度である。栄養剤そのものは消耗品であり、適時交換（1回/10日）が必要であるが、栄養剤を詰めたタンクごと

ワンタッチで交換できるようになっており作業はいたって簡単である。

また、ドック入り時などの運転停止時については、停止期間により運用管理が異なるが短期間（1週間以内）の停止期間であれば問題はないと考えられる。また、長期にわたる停止の際でも、栄養剤と空気の供給を行えば性能を持続させることが可能である。

本装置にかかるランニングコストは、ポンプ動力、バイオリアクタへのばっ気及び加圧タンクへの供給エア、及び栄養剤購入費程度である。従来のように、フィルタやコアレスサエメントの交換と洗浄に要する費用と比較して、低ランニングコスト化が実現できた。

4. 今後の課題と将来展望

4.1 型式認定の取得

これまでの開発の結果、船舶機関室ビルジが微生物によって放流規制値（船上からの放流油分15ppm以下）を十分に満足できる水質にまで処理できることが実証され、実用化への第一歩を踏み出した。ところが、MAPOL条約では、船舶ビルジの処理方式としての生物的处理方法は認定されておらず、本システムのみで処理したビルジを船外へ放流することはできない。したがって、現在のところ本装置は従来の物理的处理方式におけるフィルタ目詰まりの防止、メンテナンス軽減のための前処理装置として設置せざるを得ない状況である。

しかし、内航船のように沿岸を航行する船は、ビルジ（油分）の放流に関して神経質にならざるを得ず、機関室作業員の作業時間の大部分がビルジ処理装置の管理に取られることもある。船舶の近代化による乗組員数の減少に合わせて、機関室内の省力化を図るためにも、低ランニングコストで、メンテナンスの容易な本システムの導入は十分な価値があると言える。一方、現在、型式認定のための手続を終え、認証試験準備中である。

本システムが船舶機関室ビルジの処理方式として認定されれば、他のビルジ処理装置を併用する必要がなくなり、本来の開発目的を達成できるとともに、ユーザ側のコスト低減も加速されることになる。

4.2 陸上含油排水への適用拡大

本システムは船舶機関室の含油排水を対象とした処理装置として開発してきたものであるが、油を含んだ排水は海上よりも陸上から排出されるものの方が種類、量ともはるかに多い。そこで、筆者らは現在、本生物処理装置の陸上含油排水への適用を検討している。しかし、陸上含油排水にはNCマシン等で使用される切削水や研削水、エタン・フロン代替洗浄剤等、処理の困難なものが数多い。これらの排水中には油分以外に界面活性剤等の難分解性の化合物が高濃度で存在しており、その分解性の向上が陸上含油排水処理適用のかぎを握っていると考えられる。

参考文献

- (1) 海洋汚染防止条約, 海文堂
- (2) Beerstecher, E., Petroleum Microbiology, Elsevir Press, Inc., New York (1954)
- (3) バイオテクノロジー辞典, シーエムシー (1989)
- (4) 藤田ら, 近畿大学環境科学研究所研究報告 Vol.19 (1992)
- (5) Tanaka, H. et al., MBI REPORT (1992)
- (6) Iizuka, T. et al., MBI REPORT (1992)
- (7) 菅田ほか, 三菱重工技報 Vol.32 No.2 (1995) p.113