

微生物による有機系排水処理と余剰微生物の資源化に関する研究（その1）

——光合成細菌と藻類による排水処理に関する基本的検討——

加藤 顕 喜田 大三
窪 寺 友子 辻 博 和
(本社 エンジニアリン
グ本部)

Development of Technology for Organic Wastewater Treatment by Microorganisms and Production of Materials for Conserving Environment (Part 1)

——Organic Wastewater Treatment by Photosynthetic Bacteria and Microalgae——

Akira Kato Daizo Kita
Tomoko Kubotera Hirokazu Tsuji

Abstract

Obayashi Corporation has participated in “The Research Institute of Innovative Technology for the Earth (RITE)” since July 1991, and intends to work on “development of technology for organic wastewater treatment by microorganisms and production of materials for global environment conservation” as the Kiyose Section of RITE until March 1995.

It is aimed to achieve development of two technologies: ① thick organic wastewater treatment by photosynthetic bacteria and microalgae instead of activated sludge bacteria, and ② processing surplus microorganisms into materials for global environment conservation (use in agriculture, revegetation, purification of water areas).

This paper describes organic wastewater treatment by photosynthetic bacteria and results of microalgae cultivation tests working on water treated with photosynthetic bacteria.

概 要

当社は、平成3年7月から(財)地球環境産業技術研究機構(通称 RITE)の通産省補助事業に参画し、RITE 清瀬研究室として、表記研究開発を平成7年3月までの予定で進めている。

当該研究は、高濃度の有機系排水を、従来の活性汚泥菌に代わって、光合成細菌および微細藻類を使用して処理する技術を開発すると共に、排水浄化の過程で発生する余剰の菌体・藻体を積極的に再利用すべく、広く地球環境の保全に活用できる緑化・農業用の環境保全資材に加工する技術の開発を目指すものである。

本報告では、光合成細菌による有機系排水処理および光合成細菌による処理水を対象とした微細藻類の培養試験に関して報告する。

1. まえがき

地球環境と調和した産業技術の開発を推進し、新たな産業技術体系への変革を目指して、(財)地球環境産業技術研究機構では、平成2年度から、地球環境保全関係産業技術開発促進事業(通産省補助事業)が進められている。当該促進事業では、温室効果ガス対策に資する技術、環境負荷低減に資する技術、地球環境保全に資する測定技術の3つの技術の開発がテーマとなっている。

当社(RITE 清瀬研究室)では、このうち、環境負荷低減技術に資する技術の開発として、平成3年度から、「微生物による有機系排水処理と環境保全資材製造の技術開発」を進めている。

従来、有機系排水の処理に当たっては、一般に活性汚泥法で水処理し、その余剰汚泥を脱水後焼却処分する方法が採用されている。この方法では、排水の浄化を第一の目的としており、排水中の有機物質さらには栄養塩類の再資源化を図ろうとするものではない。さらに、余剰汚泥の処分に際しては、その減容化を図るために焼却処理を採用し、結果として多量の炭酸ガスを発生させている。

そこで、RITE 清瀬研究室では、有機系排水の浄化を行いつつ、排水中の再利用可能な物質を回収するシステムとして排水処理に従来の活性汚泥菌だけでなく、光合成細菌さらには藻類を使用することを検討している。その際に発生する余剰の菌類・藻類を積極的に再利用すべく、広く地球環境の保全に活用できる農業用・緑化用さ

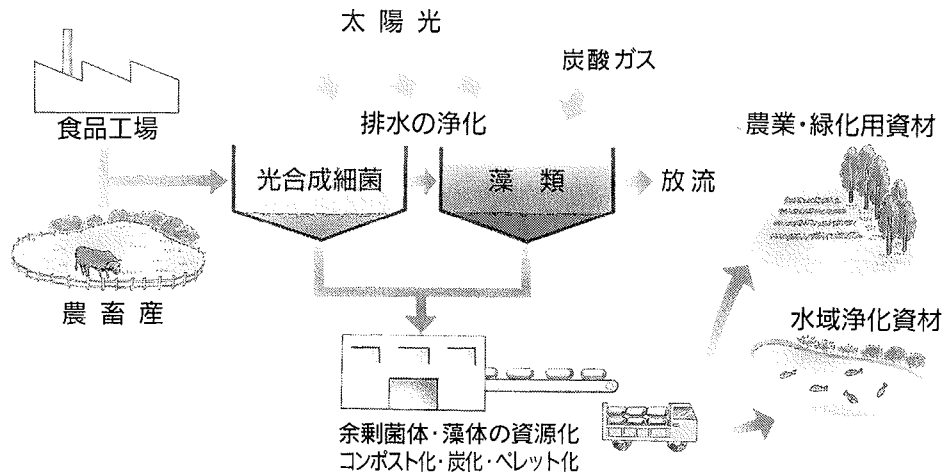


図-1 排水から環境保全資材を製造し地球環境の保全に貢献するトータルシステム

らには水域浄化用の環境保全資材に加工することとしている。

本報告では、当技術開発の概要を紹介するとともに、①光合成細菌による有機系排水処理、②光合成細菌による排水処理後の処理水を対象とした代表的藻類の培養試験に関して報告する。

2. 研究開発の概要

- ① 事業名：(財)地球環境産業技術研究機構の地球環境保全関係産業技術開発促進事業「環境負荷低減に資する技術の開発」
- ② 担当テーマ名：微生物による有機系排水処理と環境保全資材製造の技術開発
- ③ 担当機関：大林組（RITE 清瀬研究室）
- ④ 期間：平成3年7月～7年3月
- ⑤ 適用対象：食品製造工場など
- ⑥ 開発目標：高濃度の有機系排水を光合成細菌および藻類を用いて浄化し、その排水処理の過程で発生する余剰の菌体・藻類をコンポスト化・炭化などの方法で加工して、農業用・緑化用さらには水域浄化用の環境保全資材を製造し、地球環境の保全に活用するトータルシステム（図-1）を開発する。

3. 有機物分解における光合成細菌と藻類の役割

各種の有機物を大量に含む濃厚排水を自然に分解浄化させた際、図-2に示すような微生物群の遷移が観察され、その時の浄化が表-1に示すように進行することが、小林らによって確認されている^{1),3)}。自然界において、BOD値数千ppm以上の濃厚な有機系排水が分解浄化されてゆく過程では、まず有機栄養微生物が増殖し、引き続いて光合成細菌が増殖してくる。そして光合成細菌増殖後、最後の段階になって藻類が増殖し、浄化は完了する。

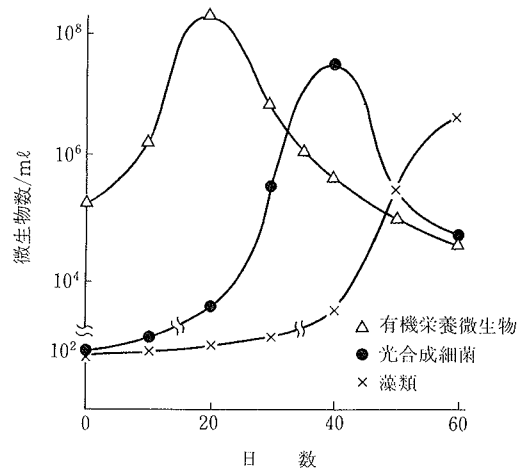


図-2 自然界における高濃度有機系排水の浄化過程における微生物群の遷移^{1),3)}

表-1 稲わら、羊毛洗浄排水、生し尿分解時¹⁾におけるBOD値(ppm)の経時的変動

| | 有機栄養微生物生育時 | 光合成細菌生育後の上液部 | クロレラ生育後の上液部 |
|------|------------|--------------|-------------|
| 稲わら | 10,000以上 | 200~500 | 10~50 |
| 羊毛廃液 | 20,000以上 | 500~800 | 10~60 |
| 生し尿 | 20,000以上 | 200~500 | 10~50 |

光合成細菌・藻類の利用による有機系排水処理の基本的立場は、このような自然界における微生物群の遷移による高濃度の有機系排水の浄化プロセスを人為的に積極的に再現しようとするものである。

4. 光合成細菌による有機系排水処理

4.1 光合成細菌について^{1)~5)}

光合成細菌とは、光をエネルギー源として溶存酸素の少ない場所で有機物を分解して生育する細菌群で、水田・溝・河川・湖・海岸・下水処理場などの汚濁度の高い湛水状態の所に分布している。種類は緑色硫黄細菌、紅色硫黄細菌、紅色非硫黄細菌の3つに分類され、各種

表一2 光合成細菌の種類と特徴^{2),4)}

| 種類 | 主な属 | 色 | 生育に有効な水素供与体 | 主な炭素源 | 生育条件 |
|---------|---------------------------|----------|-------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------|
| 緑色硫黄細菌 | Chlorobiumなど 3属 | 緑 | H ₂ S, H ₂ など 有機物利用は例外 | CO ₂ | 嫌気明 |
| 紅色硫黄細菌 | Chromatiumなど 10属 | 紫, 赤 | H ₂ S, H ₂ など 有機物も利用 | CO ₂ 有機物 | 嫌気明 |
| 紅色非硫黄細菌 | Rhodospseudomonas など3属 | 紫, 赤, 褐色 | 有機物を極めて 良く利用 H ₂ | 有機物 が主体 CO ₂ | 嫌気明 好気明 好気暗 |

類の特性は表一2に示す通りである。

有機系排水処理において、主に活用されようとしている光合成細菌は紅色非硫黄細菌である。主として低級脂肪酸のような有機物を好んで利用し、しかも、光照明嫌気条件、光照明好気条件あるいは暗黒好気条件でも増殖が可能である。

このような特性を有する紅色非硫黄細菌の応用研究がすすめられ、豆腐工場排水や缶詰工場排水などの濃厚有機排水の処理への実用化が図られつつある。

また、光合成細菌の菌体成分として、バクテリオクロロフィル、カロチノイド、各種アミノ酸、ビタミンなど光合成色素をはじめとする各種生理活性物質が含まれており、有機肥料、畜産飼料、水産餌料、薬品等への付加価値の高い利用の可能性を有している。

4.2 有機系排水処理と光合成細菌

有機系排水の処理に一般に広く用いられているのは活性汚泥法である。この処理法は、有機物濃度が低い排水において、最も浄化効率が高く、良質の処理水を得ることができる。

ところで、製造業における有機系排水の代表的な排水源は食品品製造業である。食品品製造業の工場排水の特徴として、一部工程にBOD値数千～数万ppmを示す濃厚有機排水の排出源があり、そのために全排水の汚濁負荷が一般的に高くなっている。

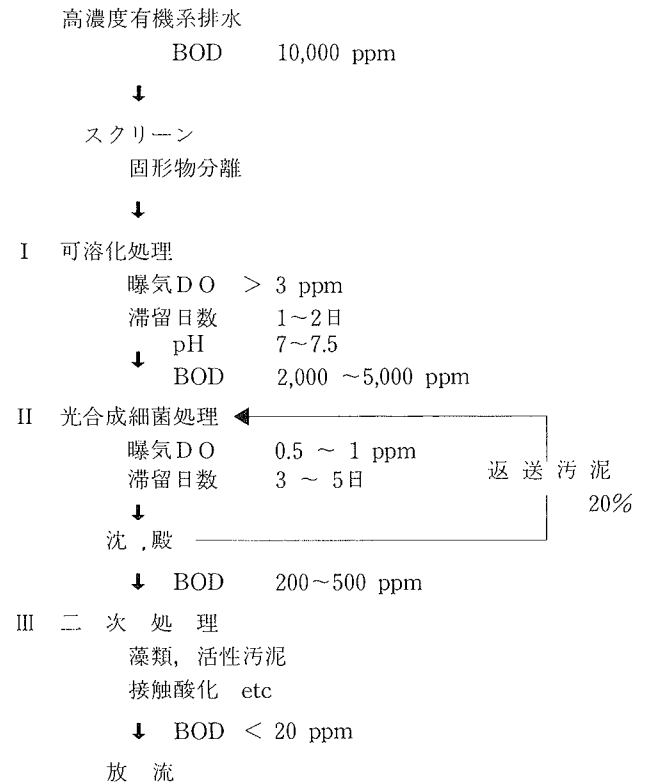
このような高濃度有機系排水の処理に活性汚泥法を適用した場合、多量の希釈水を用いて処理槽への負荷を下げる必要がある(BOD容積負荷0.5~1kg/m³・day)、その結果、処理槽の高容量化、運転動力の増大などが重要な課題となっている^{1),4),5),6)}。

そのために、近年このような高濃度有機系排水の無希釈処理を可能とする光合成細菌による有機性排水の処理が注目されてきている。

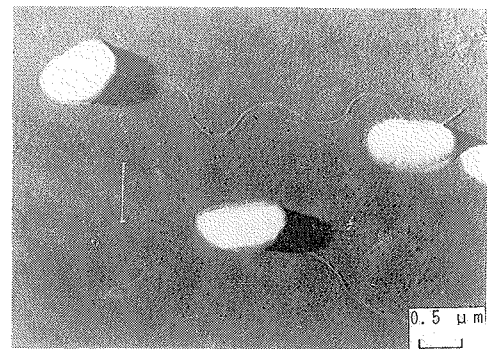
本研究は、このような光合成細菌による高濃度有機系排水の処理特性を活用した処理システムの開発を図ろうとするものである。

4.3 光合成細菌による有機系排水処理の事例

光合成細菌の利用による有機系排水処理の基本的立場は、先に示した自然界における微生物の連続的変動によ



図一3 光合成細菌による高濃度有機系排水処理の一般的フローシート⁶⁾



写真一1 Rhodospseudomonas capsulataの電子顕微鏡写真

る高濃度の有機性排水の浄化プロセスを人工的に再現しようとするものである。図一3は、小林らの提示する光合成細菌による高濃度有機排水処理の一般的フローシートである⁶⁾。まずスクリーンで固形物をできるだけ除き、第1槽で有機栄養細菌を主な分解者として可溶化処理を行う。この処理で高分子化合物が低分子化合物へ分解され、同時にBOD値も数千ppmに減少する。次の第II槽が光合成細菌が優先種として有機物の分解を行う槽で、ここでBOD値は数百ppmまで、即ち下水道への放流基準を満足する程度まで浄化される。さらに浄化が必要な場合は、第III槽として藻類や活性汚泥などによる二次処理が付加される。

ここで、実際に豆腐製造工場および弁当製造工場の排水処理場を調査した結果を、光合成細菌処理槽における

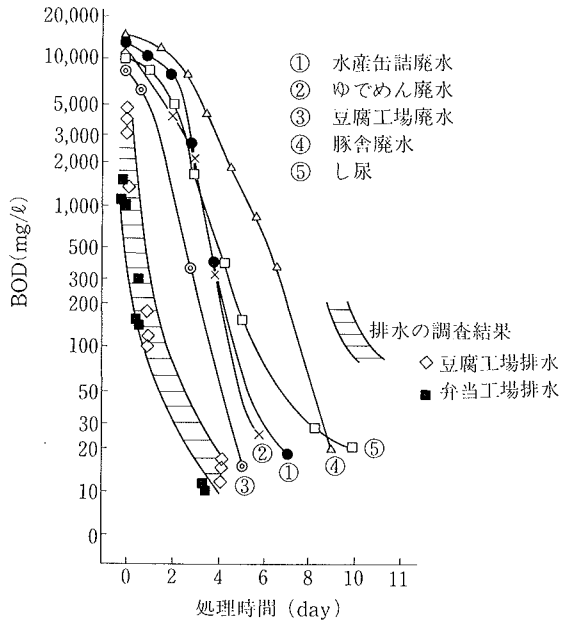


図-4 光合成細菌を用いた有機系排水処理の現場調査の結果⁵⁾

BODの処理状況として、横軸に処理時間を取って図-4に示す⁵⁾。また、図中には文献値を併記した。なお、これら処理場では写真-1に示す紅色非硫黄細菌 *Rhodopseudomonas capsulata* が使用されている。

図-4から明らかのように、光合成細菌を用いることによって、1,000~5,000 ppmの高濃度のBODを直接処理でき、かつ3~4日の処理時間でBODを10~20 ppm程度まで処理できることが確認できた。また、図中に併記したように、BODが1~2万 ppm前後と高い濃度の水産缶詰廃水、豚舎廃水なども5~10日の処理時間で、BODが20 ppm程度まで低減されていることが分かる。

4.4 光合成細菌による有機系排水処理の特徴

4.1~4.3の調査結果から、光合成細菌による有機系排水の処理に関して下記の特徴が明らかになった^{1),4),5),6)}。

① BOD数千ないし2~3万 ppmの高濃度の有機系排水の無希釈処理が可能で、処理槽の容積負荷として、1.5~3 kg-BOD/m³·dayと大きく取ることができ、従来の活性汚泥法に比べて、処理装置、敷地の小規模化が可能

② 活性汚泥法に比べて溶存酸素量が少なくすみ、曝気のための動力消費の大幅な節減が可能

③ 適応範囲が広く、維持管理が容易

④ 副生菌体の有効利用が期待できる

以上の特徴から、環境負荷低減さらには環境保全に資する技術として、高濃度の有機系排水の処理には、光合成細菌を積極的に活用すべきと判断した。

5. 代表的藻類による排水処理試験

光合成細菌で処理した処理水中には、窒素が10~60 ppm、リンが10 ppm程度残存しており、直接放流した場合、水域に悪影響を与えると懸念されるため、これらを

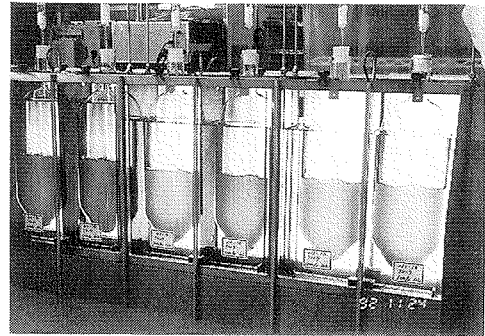


写真-2 藻類培養装置による培養試験状況

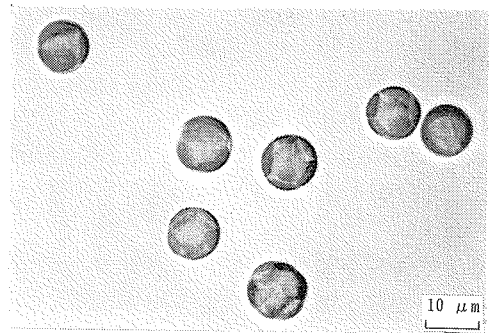


写真-3 *Chlorella regularis*の顕微鏡写真

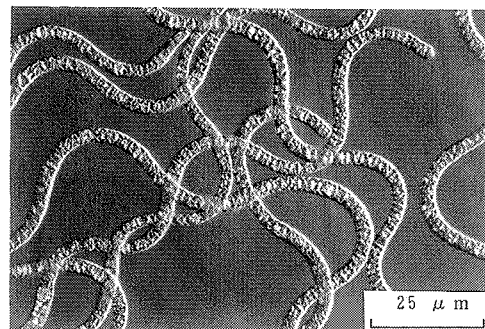


写真-4 *Spirulina platensis*の顕微鏡写真

除去することが好ましいと考えられる。

本研究ではそれらを藻類を用いて吸収・除去する。そこで、まず①モデル排水を用いた代表的藻類の各種培養試験を行い、排水処理に適した藻類を選定した。続いて②実排水を対象として、選定した藻類による各種培養試験を行い、藻類による排水処理の基礎資料を得た。ここでは、その試験結果の一例を示す。

5.1 試験装置

写真-2に藻類培養装置による試験状況を示す。水槽が6槽あり、最大2 l 亀型フラスコが6体設置できる。各フラスコについて光量・通気量の調整が可能であり、フラスコ2体毎に温度・通気量調整が可能である。

5.2 供試藻類

藻類生産業において代表的な藻類である、緑藻類のクロレラ(写真-3)および藍藻類のスピルリナ(写真-

4) を使用した。いずれも東京大学応用微生物研究所より種株を入手した。

5.3 供試排水

①の試験では、モデル排水として技術研究所内に設置してある合併浄化槽の排水、②の試験では、4.3で示した豆腐製造工場および弁当製造工場の光合成細菌処理後の処理水を使用した。但し、窒素濃度が低い処理水については、硝酸ナトリウムを適量添加した。

5.4 試験条件

基本的には、共通に光が3,000 (lx) 24時間連続照射、水温が25°C、吹き込むエア量は0.5 l/minとした。但し、試験内容に合わせて光、水温は適宜変化させた。

5.5 試験結果および考察

5.5.1 モデル排水を用いた代表的藻類の各種培養試験

培養条件として、増殖に対する(1)水温の影響、(2)照度の影響に関して試験を行った。各試験結果を図-5、6に示す。

(1) 水温の影響に関して 図-5よりスピルリナは温度上昇に伴って増殖量も増すが、15°Cでは極端に低下していることが分かる。一方、クロレラは、15°Cでは若干低いが20、25°Cではほぼ同等である。文献によればスピルリナの最適温度は30~35°C⁷⁾、クロレラは25°C付近⁸⁾とされており、スピルリナは最適温度が高いため、先の挙動を示したと考えられる。

(2) 照度の影響に関して 図-6よりスピルリナ、クロレラともに、照度が高くなるにつれて増殖量が増しており、照度が増殖に大きく影響していることが分かる。また、10,000~15,000 (lx) の高照度では、増殖量に大差が見られない。これは藻体濃度が高濃度になり、溶液内部に十分な光が供給されなくなったためと考えられる。排水処理に利用する培養槽に関しては、効率の良い光供給の構造を検討していく必要がある。

実際に藻類を用いて排水処理を行う場合、野外に培養槽を設置する可能性が高く、季節による水温の変化が処理能力に影響を与えると考えられる。処理能力を安定させるためにも水温の影響が大きく現われない藻類が適していると考えられ、(1)の結果からクロレラが好ましいと言える。また、予備的に光合成細菌処理水を用いて培養試験を行った結果、スピルリナは、藻体の色調が薄くなり凝集状態を示すなど、生育に異常を来すものが一部観察された。

よって、藻類による排水処理にはクロレラを使用することとした。

5.5.2 実排水による排水処理試験 豆腐製造工場排水

および弁当製造工場排水の光合成細菌処理水を用いたクロレラ培養試験を行った。いずれの処理水においても、藻体の色調・分散状態に異常を示すことなく、比較的良好な増殖挙動を示すことを確認した。

藻体濃度および窒素 (NO₃⁻-N)・リン (PO₄³⁻-P) 吸収の挙動を図-7、8に示す。両工場の処理水において、クロレラが増殖すると共に、初期濃度は異なるが30~50

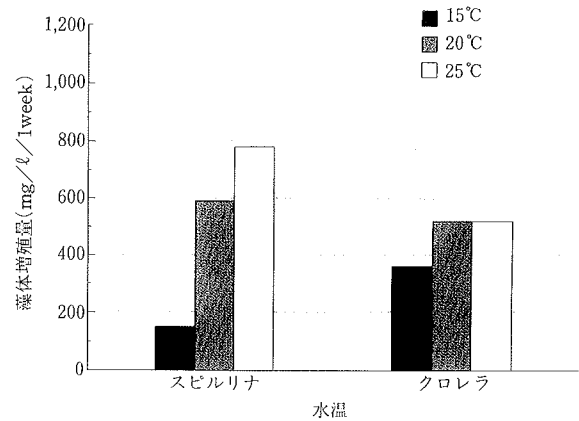


図-5 代表的藻類の増殖における水温の影響

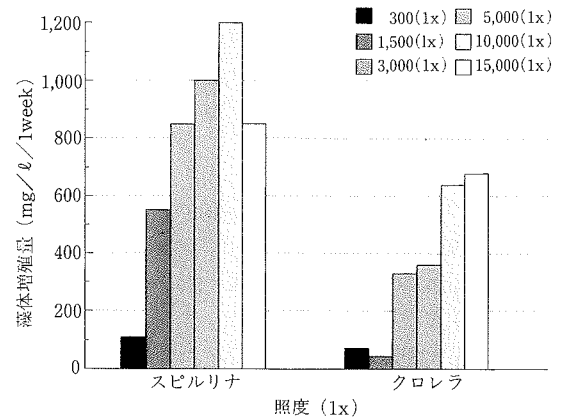


図-6 代表的藻類の増殖における照度の影響

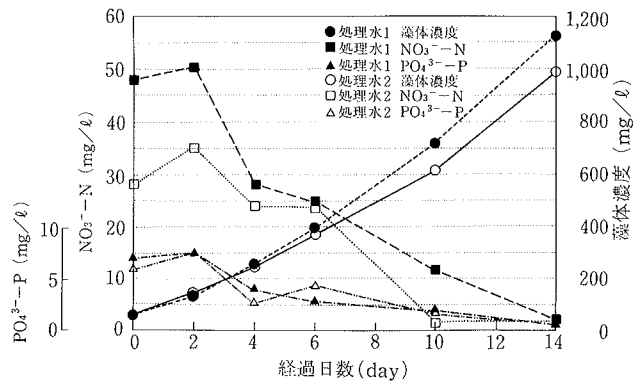


図-7 光合成細菌処理後の処理水でのクロレラ培養試験結果 (豆腐製造工場)

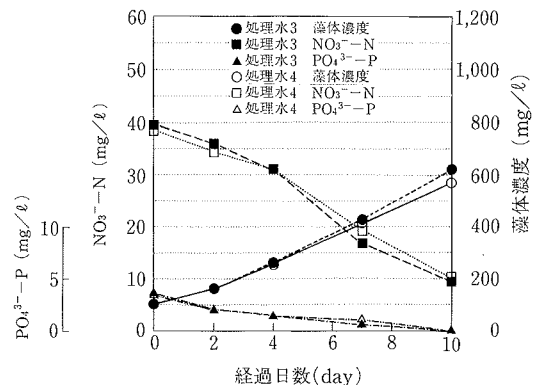


図-8 光合成細菌処理後の処理水でのクロレラ培養試験結果 (弁当製造工場)

ppm の窒素は10日間以降にほぼ 0 ppm, 3~7 ppm のリンは 1 ppm 程度まで低下していることが分かる。

増殖に際しての窒素・リンの除去量を概算すると、窒素は増殖した藻体量の乾物重当り約 5~6%, リンは約 0.8%であった。一部、得られた藻体中の窒素含有量を CHN コーダーで分析した結果、5.8~6.3%であり、ほぼ同等であることから、除去された窒素はクロレラに移行していることが確認できた。

また、両工場について 2~4 日目までの藻体増加量から、次式で定義される比増殖速度 μ を求め⁹⁾、培養初期の増殖状況を比較した。

$$\ln(C_t/C_0) = \mu t$$

C_0 : 初期濃度 μ : 比増殖速度 (1/day)

C_t : t 日後の濃度 t: 経過日数

豆腐製造工場は μ が 0.26~0.33, 弁当製造工場はそれより低い 0.22~0.24 であった。これは、豆腐製造工場の処理水に比べて、増殖に必要なリンの初期濃度が低いことが原因と考えられた。

ここで、先に例示した試験も含めた、実排水によるクロレラの各種培養試験における比増殖速度 μ (初期濃度 200~300 ppm) の頻度分布を図-9 に示す。頻度が多いのは 0.2~0.35 (1/day) であった。また、ピークが 0.2 と 0.3 付近の 2 箇所に見われた。現在、原因を究明中であるが、全体から見れば標準培地⁶⁾で培養した場合の μ が 0.3 と比較して、同等もしくはやや低い程度である。

以上の試験結果から、光合成細菌による処理水中でクロレラを培養することによって、処理水中に残存した窒素・リンを処理日数はかかるが、十分に吸収・除去できると判断された。今後は処理効率を上げるための各種培養条件の検討を行っていく必要がある。

6. まとめ

当社は、平成 3 年 7 月から (財) 地球環境産業技術研究機構に参画し、「微生物による有機系排水処理と環境保全資材製造の技術開発」に関して、平成 7 年 3 月までの予定で研究を進めている。今回は、光合成細菌・藻類による有機系排水の処理に関して検討した。以下に明らかになった内容を示す。

① 有機系排水処理に光合成細菌である紅色非硫黄細菌を用いることで、BOD 数千ないし 2~3 万 ppm の高濃度の有機系排水を無希釈処理でき、従来の活性汚泥法に比べて、処理装置、敷地の小規模化が可能となる。

② モデル排水によるスピルリナとクロレラ培養試験結果から、スピルリナは、生育が水温に大きく影響され、特に低温において著しく低下すること、さらに実排水による培養では生育に異常を来たすものがあったことから、藻類による排水処理にはクロレラを使用することとした。

③ 実際の光合成細菌処理後の処理水を用いて、クロレラ培養試験を行った結果、排水中に残存している窒

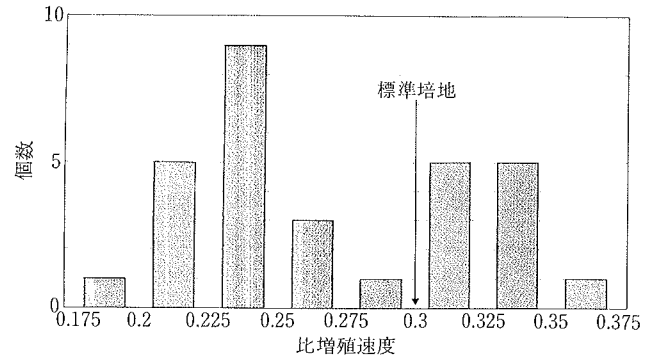


図-9 実排水でのクロレラの比増殖速度の頻度分布

素・リンがクロレラの増殖に伴って、十分に吸収・除去されることが確認できた。窒素の除去量は、増殖した藻体量の乾物重当り約 5~6%, リンは約 0.8%であった。また、比増殖速度は、藻体濃度濃度 200~300 ppm において 0.2~0.35 (1/day) であった。

7. おわりに

以上、光合成細菌・藻類による有機系排水処理についての検討結果を報告した。

現在引き続き、光合成細菌による有機系排水処理において処理条件を明確にするために、室内処理試験を行っている。さらに、藻類による排水処理に関しては、野外プラント試験を計画しており、追って報告する予定である。

なお、今回報告できなかった、排水処理後の余剰菌体・藻体の環境保全資材化に関する検討内容は、上記の内容とともに後日報告する。

参考文献

- 1) 小林達治:「光合成細菌利用による濃厚有機排水の資源化処理」, 用水と排水, Vol. 27, No. 11, p. 40~45 (1985)
- 2) 小林達治:「光合成細菌の基礎」, 日本土壤肥料学雑誌, Vol. 47, No. 3, p. 101~109 (1975)
- 3) 小林達治:「光合成細菌」, 環境技術, Vol. 13, No. 9, p. 692~695 (1984)
- 4) 北村 博:「光合成細菌による廃水処理の応用例」, PPM, No. 8, p. 32~47 (1976)
- 5) 北村 博, 他:「光合成細菌」, 学会出版センター, p. 114, p. 119, p. 329~338, p. 343 (1984)
- 6) 照屋輝一, 他:「光合成細菌による濃厚有機排水の処理と菌体の多目的高度利用に関する研究(第1報)“光合成細菌による泡盛醸造廃水の処理”」
- 7) 島松英典:「微細食用藻スピルリナの量産(上)」BIO INDUSTRY, Vol. 3, No. 5, p. 379 (1986)
- 8) 田宮 博, 他:「藻類実験法」, 南江堂, p. 50, p. 73 (1975)
- 9) 須藤隆一:「バイオテクノロジー基礎講座 第16回」, 用水と排水, Vol. 30, No. 4, p. 380 (1988)