

■ 技術報告 ■

濃厚有機廃水の光合成細菌による資源化処理

Purification of Concentrated Organic Waste Solution by
Phototrophic Bacteria and the Utilization of Byproducts小林 達 治*
Michiharu Kobayashi

はじめに

私達は20数年前に、自然界において、光合成細菌は浄化作用に、大いに貢献していることを見出し、その浄化の理論的根拠を詳細に検討し、B.O.D値数千ppm～数万ppmという濃厚有機廃水の無稀釈浄化処理ならびに副生菌体の有効利用に成功した。

当時、廃水処理については、省エネルギー、省資源ということは、余り、重要視されない時代であったので、社会は、それ程、大きく取り上げなかったが、第1次、第2次オイルショックの後、我々の技術が見直され、急に注目されるようになり、現在、国内、国外共に実用化プラントが多数、稼動するようになった。

以下に、その概略について説明したい。

光合成細菌による水処理技術

光合成細菌は図-1に示すようにB.O.D値数千ppm以上の濃厚有機廃水が自然に分解、浄化されてゆく過程において、有機栄養微生物の増殖後に次いで、よく増殖してくる。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。その時のB.O.D値やアンモニアの量的変化を表1に示した。

このような微生物の生態的変動を利用して、濃厚有機廃水を人工プラントで効率的に浄化処理するための実験がテストプラント並びに大型パイロットプラントでもって行なわれ、10数年前に実用化に成功した。その概略図を図-2に表示する。

まず、最初に、第1槽で曝気する。これは好気性微生物による有機物の分解を促進すると共に、第2槽の光合成細菌による浄化作用が、好気性菌との共存により、より浄化が促進されるからである。

1日間、曝気後、第2槽の光合成細菌培養槽へ移行させる。図-2はフロシートを示すため、光合成細菌槽

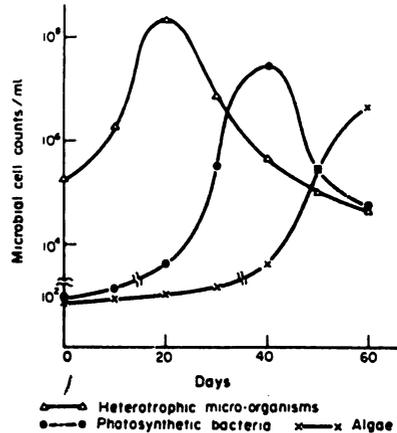


図-1 Microbial changes during the decomposing process of organic materials under submerged natural condition.

表1 Purification of polluted water, including organic materials, under natural biological process

	Ammonia ppm	B.O.D. ppm
Heterotrophs growing stage	over 5,000	over 5,000
After growth of photosynthetic bacteria	200-500	200-600
Photoautotrophs growing stage	10-50	10-60

は1槽しか、明記していないが、実際は図-3に示すように、4つに仕切りを設けてある。その理由は各種の排出源によっては、廃水の流量が極端に不均一であり、或る時には大量の廃水が投入されて、それらが浄化された液と混合されてしまう、すなわち浄化処理出来た水と曝気槽からの流入液が直接まざらないように仕切りを設けることにした。その構造は簡単なもので光合成細菌槽の中の1槽から4槽までの下部に穴をあけて、順次、通過しながら光合成細菌槽の中の最終第4槽へ出てくるようにしてある。それにより浄化は安定化されることになった。

* 京都大学農学部助教授

〒606 京都市左京区北白川

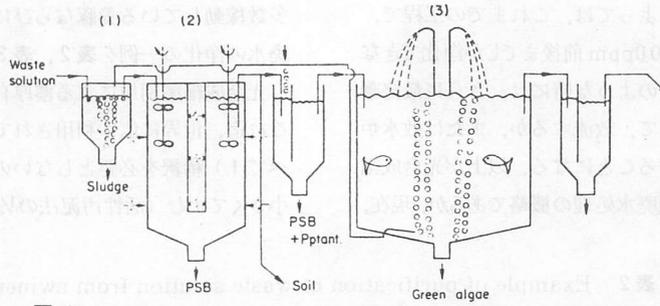


図-2

Tank 1. Receiving tank. The liquid waste is received in this tank and the suspension aerated for 20 h (even during the inflow of waste solution, e.g. sewage). The pH will vary according to aeration, especially for liquid waste containing protein. Higher aeration increase pH and vice versa. For liquid waste from pharmaceutical industry (penicillin and erythromycin production) aeration is not required. In this case Tank no. 1 is used as a storage tank for short periods. If storage is to be prolonged it is essential that aeration be carried out to prevent deterioration of the waste product by anaerobic fermentation. After initial aeration, the aerobic environment is eliminated by the stoppage of air supply. The large particles settle on the bottom of the tank and the supernatant is transferred to Tank no. 2. This conversion of the conditions from aerobic to anaerobic is essential in order that the accumulation of sludge be avoided. New liquid waste is added and the aeration resumed. This tank is a closed system type and the atmosphere containing the unpleasant odour is piped into Tank no. 3, or to an earth column to be purified.

Tank 2. Photosynthetic bacteria (PSB) tank. This tank is illuminated continuously by combined day light and artificial light. The suspension is agitated but not aerated by mechanical propellers. In most cases the pH will remain at a suitable level, however, for waste water from penicillin production, it is advisable to adjust the pH (pH = 7.0-7.5) with an alkaline solution. After 24 h 20-30 per cent of the liquid is transferred to a by-pass settling tank. The PSB cells are collected by simple precipitations with hydrolyzed chitin solution (0.01-0.001 per cent for liquid waste) and the supernatant is transferred to Tank no. 3. (If the separation of PSB cells is not required, the suspension can be used directly as fertilizer.) The 70-80 per cent remaining liquid is used as starter for the next purification.

Tank 3. Algal culture tank. Tank no. 3 is aerated by the gas produced from Tank no. 1, and by the air. If the liquid from Tank no. 2 is deficient in mineral elements (e.g. from erythromycin production), small quantities of N, P, K, Mg should be added to promote the growth of algae. The liquid is maintained for totally 5 days. The aeration is stopped every day and the algal cells are collected. The algal cells settle down to the bottom of the tank and can be readily harvested. (At this point in the process 20-30 per cent of the purified water can be released.) However, this harvesting operation can be obviated if nylon netting is set on the surface of the algal tank. By overflooding the culture, the algal cells will be collected by the nylon net. The algal cells can then be used as animal and fish feed.

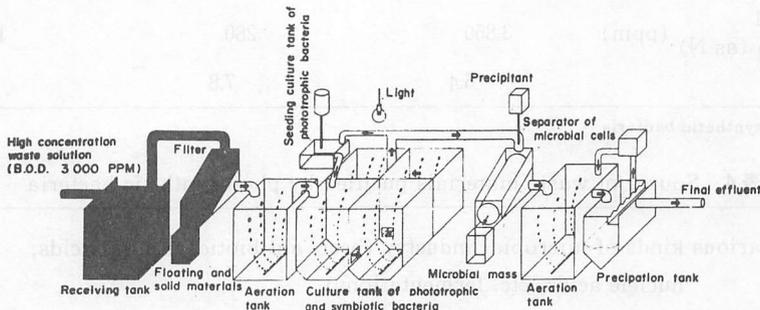


図-3 Flow sheet for purification of organic waste water by using phototrophic bacteria

光合成細菌槽では曝気をする必要はなく、ゆっくり攪拌できる程度の通気でもよい。

光合成細菌槽の最終第4槽から流出した菌体懸濁液は次の沈殿槽で滞留させ、下部より菌体を採取する。

沈殿槽を設置できない程、敷地面積の狭い工場などでは、キチン質(加水分解物)など天然凝集剤で“フロック”を作り、ロータリーネットなどで菌体を分離することもある。

廃水の濃度や種類によっては、これまでの工程で、B.O.DやC.O.D. が100ppm 前後までしか浄化できないものがあるので、そのような時には、さらに最終曝気槽で曝気浄化処理して、放流するか、または散水炉床を通した後、放流することになる。以上が光合成細菌利用による濃厚有機廃水処理の概略であるが、現在、

多数稼働している養豚ならびに食品工場（豆腐工場）廃水の浄化の一例を表2、表3に示しておこう。

光合成細菌利用による濃厚有機廃水処理の特徴は、これ迄、世界に広く利用されてきた、活性汚泥法に比べて1.) 稀釈を必要としないので、処理施設が非常に小さくて済む（活性汚泥法の $\frac{1}{2}$ ~ $\frac{1}{3}$ ）。また、水量が不

表2 Example of purification of waste solution from swinery

		Original	Supernatant in precipitation tank after PSB* treatment	Discharged water
BOD	(ppm)	6,600	380	15
COD	(ppm)	3,364	354	64
SS	(ppm)	6,540	450	17
Kjeldahl nitrogen (as N)	(ppm)	915	32.8	7.8
pH		6.8	7.3	7.1

* PSB : Photosynthetic bacteria

表3 Example of purification of waste solution from bean cake factory

		Original	Supernatant in precipitation tank after PSB* treatment	Discharged water
BOD	(ppm)	11,300	340	15
COD	(ppm)	9,800	270	17
SS	(ppm)	3,930	23	5
Kjeldahl nitrogen (as N)	(ppm)	3,850	280	11
pH		6.4	7.8	7.2

* PSB : Photosynthetic bacteria

表4 Source of waste materials purified by photosynthetic bacteria

Various kinds of microbial industry (beer, antibiotics, amino acids, nucleic acids, etc. fermentations)
 Various kinds of chemical synthesizing industry (synthetic fibers, synthetic resins, chemical fertilizers, chemicals, etc.)
 Various kinds of food industry (canned food, bottled food, cakes, miso, tofu, : bean cake, etc.)
 Petroleum industry
 Starch and wool industry
 Others : activated sludge, excrement, other organic materials

足する所では最適の浄化処理法といえる。2. 活性汚泥法は2次的に排出されてくる汚泥の処理に困るが、光合成細菌法では次に述べるような有効な資源として利用できる。3.) 処理施設が活性汚泥法に比べて小さくてすむので、稼働費、その他、すべて経費が安くつく等、省エネルギー、省資源の立場から、長所が非常に多い。また、濃厚な有機物を含んだまま処理するので、分解に際して発生する微生物の発熱現象で水温が上昇し、寒冷地帯での浄化処理には最高の処理法となっている。

光合成細菌で処理できる廃水の種類は表4に示すように、かなり広範囲にわたることが確かめられており、今後、益々この方式の設置は急速に伸びるであろう。特に、これ迄、活性汚泥法を用いてきた処理施設では、例えば製品の増産を希望する工場など、その施設の改良には最適の処理技術として受け入れられるようになった。

光合成細菌体の利用

廃水の処理により副産物として生産される光合成細菌体がどのような成分を含み、どのような利用面があるかについて概略説明する。

(1) 菌体成分

(a) 一般成分ならびにアミノ酸組成

表5、表6に示すごとく、たんぱく質含量が高く、各種アミノ酸含量も、ほぼ均等で人工消化率もカゼインなみという質の良さが認められている。

(b) 色素、ビタミンならびにミネラル含有量

色素含有量は光の照度、酸素分圧、基質の種類、その他、培養条件により変動が大きい。普通、嫌氣的照明条件(1,000~2,000 lux)では18~20%にも達する。表7にはプロピオン酸を基質とし、照度2,000 lux流動パラフィン密封による嫌氣照明培養条件における*R. capsulata*の菌体から抽出分離したバクテリオクロフィルならびにカロチノイド系色素の含量を示した。ビタミンではB₁₂の含量が非常に高いことが認められる。

(2) 医薬としての利用

食品工場廃水など、きれいな廃水は光合成細菌利用により浄化された場合に副産物として産出された菌体は医薬や蛋白食料源として利用することができる。

光合成細菌体中にはユビキノンQ₁₀が大量に含まれていることからそれらを抽出精製し、現在、アルコール発酵廃水処理菌体から、ユビキノンQ₁₀を抽出し、

表5 Composition of general component of photosynthetic bacteria, chlorella, and yeast cells

	(g/100g dry weight)		
	Photosynthetic bacteria	Chlorella	Yeast
Crude protein	60.95	55.52	50.5
Crude fat	9.91	8.07	1.1
Soluble carbohydrates	20.83	21.04	39.3
Crude fibre	2.92	12.09	2.1
Ash	5.39	3.28	7.0

* Photosynthetic bacteria : *Rhobopseudomonas capsulata*
Chlorella : *Chlorella vulgaris*
Yeast : *Saccharomyces anomalous*

表6 Amino acid composition of the cell hydrolysates of photosynthetic bacteria, chlorella and yeast

	(g/100g dry weight)		
	Photosynthetic* bacteria	Chlorella*	Yeast*
Lysine	2.86	2.71	3.76
Histidine	1.25	1.06	0.90
Arginine	3.34	3.24	2.50
Aspartic acid	4.56	4.74	3.11
Threonine	2.70	2.28	2.65
Serine	1.68	2.12	2.75
Glutamic acid	5.34	4.62	6.21
Proline	2.80	2.12	1.77
Glycine	2.41	2.28	2.18
Alanine	4.65	2.98	2.86
Valine	3.51	3.02	3.20
Methionine	1.58	0.27	0.51
Isoleucine	2.64	2.44	2.63
Leucine	4.50	4.46	3.54
Tyrosine	1.71	0.96	1.30
Phenylalanine	2.60	2.65	2.20
Tryptophan	1.09	0.64	0.66
NH ₃	4.01	2.58	5.30

* Photosynthetic bacteria : *Rhobopseudomonas capsulata*
Chlorella : *Chlorella vulgaris*
Yeast : *Saccharomyces anomalous*

心筋梗塞の医薬として市販されるようになった。光合成細菌体中にはその他の医薬としての有効成分も多くその方面への利用開発が進められている。特にブラジルなどアルコールで自動車を走らせる時代になってき

表7 Vitamins, pigments, and other elements contents in photosynthetic bacterial cells per 100g dry weight

Vitamin	μg/100g	Element	%
B ₂	3,600	N	9.75
B ₆	3,000	P	2.49
Folic acid	2,000	K	0.21
B ₁₂	200-2,000	SiO ₂	0.82
C	20,000	Ca	0.87
D	10,000 I.U.	Na	0.31
E	31,200	Fe	0.13
		Mg	5.0
RNA	4.9%	Mn	0.00
DNA	1.0%	Cu	0.0021
Bacterio-chlorophyll	5.61%	Zn	0.11
Carotenoid pigments	4.17%		

たが、そのアルコール発酵廃液は、むしろ光合成細菌利用の立場からいえば廃棄物というよりは、むしろ光合成細菌培養基質という大いなる資源と考えられ、さらに医薬以外に食料蛋白、Biomass生産という立場からも大いに有望視される処理技術となってきた。

(3) 水産餌料としての利用

自然界において光合成細菌の生育増大後急激な動物性プランクトンの発生が観察されたので両者の相関性について¹⁴C-標識光合成細菌を用いるなど詳細な実験を行なったところ、動物性プランクトンは光合成細菌体を直接捕食利用しており光合成細菌体を添加すると緑藻などに比べて、非常に増殖力が増大することが確認された。とくに魚貝類の幼期餌料として重要な海水産プランクトンであるブラインシュリンプの増殖な

らびに活性卵の採取に、光合成細菌が非常に役立つことが判明したので、今まで不可能と考えられてきた魚種の完全人工養殖も実施できる見通しとなってきている。また、魚類（鯉、金魚、赤貝、アユなど）の孵化直後の仔魚も光合成細菌体を直接捕食利用している事実が証明され、今までの飼育方法に比べて光合成細菌体を添加すれば孵化直後の2週間～1箇月くらいに増体重、生存率とも倍以上（魚種によってはほとんど死亡しなくなる）になることが確実にされた。表8はその1例を示すものであるが鮎の孵化直後の仔魚に对照区の配合餌料に対して光合成細菌の生菌体を0.1%添加することにより生存数が非常に上がり、ほとんど死亡しなくなることを示している。また、光合成細菌のうち、紅色硫黄ならびに緑色硫黄細菌は、現在公害問題で一番悩みの多い硫化水素を大好物として利用し、無毒の硫黄粒子にしてしまうので、污水浄化技術に利用し始められている。たとえば養鰻池では冬期における水質の悪化による異常死亡が目立っているが、このような水質汚染による悪環境の防止に光合成細菌を使用して成果をあげている。

その方法を概略説明すると、バーミキュライトに吸着させた光合成細菌の生菌体を污水池に投与すると、底土に蓄積した有毒物質が除去され、あるいは減少して鰻の異常死亡が防止できる。

(4) 畜産飼料としての利用

光合成細菌体にはビタミン、その他、有効物質の含有量が多いためか、産卵鶏用飼料にわずか1万分の1の添加率で産卵率が15～20%増加する。表9はその1例を示すものであるが、そのような産卵効果は天候の

表8 Effect of photosynthetic bacteria on survival of young fry of crucian carps*

	Survival numbers after 1 month	Survival ratio (%)
Control	2,772	69.3
Treatment (with 0.1% PSB cells)**	3,860	96.5

* The experiment is carried out in a tank of 2 tons capacity with an initial number of 4000 fry.

** The PSB cells were obtained from waste treatment plant of fish meat industry. The bacterial powder contains only 50 per cent of PSB cells, the other half is made up of heterotrophic bacteria (contaminants).

表9 Effect of photosynthetic bacteria, on egg laying by hen

	Total number of eggs/6 months	Total weight of eggs/6 months (kg)	Average number of eggs laid by 200 birds	Average weight of egg (g)
Control	24,408	1,486.5	136±15	60.9±1.5
Treatment (+0.01% PSB*)	28,116	1,729.1	156±7	61.5±0.3

* See text.

表10 Effect of photosynthetic bacteria as fertilizer on the production of citrus fruit

	Average number of fruit per tree	Average weight of fruit (g)	Total weight of fruits (g)	Average sugar content (%)	Average contents of carotenoid pigments per peel of one fruit (mg)
Control	44	96	4,224	8.38	1.91
Treatment	48	112	5,376	8.87	2.02

不順な季節において、より顕著に現われる。そのほか、光合成細菌体にはカロチン系色素が多いため、産卵率の増大以外に卵黄の黄色が鮮明になる傾向が認められる。すなわち卵黄中のカロチン含量ならびにビタミンA含量を定量したところ、対照のものに比べて20%強の増大のあることを認め、卵の品質の向上に役立つことが明らかとなった。

(5) 有機肥料としての利用

光合成細菌利用による汚水処理とその資源化に適用できる廃水の種類は表4に示す通り、かなり広い範囲にわたるものである。しかし廃水の汚染が著しいものは処理した後の副産物を飼料にするよりは、農耕地へ還元して有機肥料として活用する方が自然の物質循環にかなうものと考えている。農耕地の土層を通る間に有機物は高等植物に利用されたり、土壤微生物によって分解浄化され、地下水を経過した後、河川、湖や海へ再流入する。このような汚水処理技術が最も理想的な方法であるといえよう。

図-2にフローシートを示すような第1曝気槽により畜舎汚水を分解せしめた後、第2槽で光合成細菌を生育させ、その細菌体懸濁液を農耕地へ還元すると非常に効率よく汚水を処理できる。特に興味のあることはトマト、キュウリ、ナスなど連作障害を引起す土壤に

灌水すると連作障害を防ぐことができるのである。これは病原性糸状菌を抑制する拮抗菌である放線菌等が自然に増殖してくるからにはほかならない。その他、表10に示すように、光合成細菌体懸濁液をみかんの有機肥料として施用した場合、収量増加のみならず、糖度上昇、味、色つやの向上など品質が著しく良くなる成果がでている。

ま と め

以上、濃厚有機廃水の光合成細菌利用による処理技術は単に廃水の処理のみにとどまらず、資源化利用ができるという特徴をもっている。その上、さらに今迄の処理技術より小型な装置で浄化することができるので省資源、省エネルギーであるという点でも大きな意義があり、今後この処理方式は益々発展するであろう。