

# 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3）

——藻類による排水処理と資材化の検討およびトータルシステムの提案——

加藤 顕 四本 瑞世  
杉本 英夫 辻 博和

## Development of Technology for Organic Wastewater Treatment by Microorganisms and Production of Materials for Conserving Environment (Part 3)

——Total System for Wastewater Treatment by Microalgae and its Effective Utilization——

Akira Kato Mizuyo Yotsumoto  
Hideo Sugimoto Hirokazu Tsuji

### Abstract

Obayashi Corporation participated in "The Research Institute of Innovative Technology for the Earth (RITE)" from 1991 to 1995, and worked on development of this technology at what was known as the Kiyose Section of RITE. This paper is the final report on this research, and describes the results, and examines the total system. It was found that this wastewater treatment system by algae removed 70~80% of the total nitrogen from treatment water of domestic grade wastewater at a temperature between 20 and 25 degrees C in 5 resident days, and in several ways to make the materials from algae it reduces the energy requirement that the soil is made fertile by adding algae at a mixing ratio of 1% to immature soil and disintegrating.

### 概要

当社は、平成3年から6年度まで(財)地球環境産業技術研究機構の通産省補助事業に参画し、標記研究開発を行った。今回は、藻類による排水処理試験と資材化試験の結果を報告し、さらに、その成果をもとにトータルシステムを検討した。

藻類による排水処理に関しては、生活系排水の処理水程度の水質ならば、水温20~25℃、滞留日数5日において窒素を70~80%除去できることを確認した。一方、余剰藻体の資材化に関しては、藻体を土壤に容積比1%で直接添加し、肥沃化を図る方法が、加工エネルギーの低減等の面から有効と判断された。以上の成果から、半乾燥地域の都市部において発生する生活系排水の処理水を利用して藻類を培養し、得られた藻体を未耕地土に添加して土壤の肥沃化を図るシステムを提案した。

### 1. はじめに

当社は、平成3年7月から平成7年3月まで(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、標記研究開発を行った。

当該研究開発は、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さらには微細藻類を使用して効率的に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を加工する技術の開発を目指すものである。

その1では、一次処理で光合成細菌を用い、二次処理

で微細藻類を用いる有機系排水処理の現状調査および室内試験について報告し、それらの排水処理に対する有効性を示した<sup>1)</sup>。その2では、余剰藻体の農業・緑化用資材化としての利用に関して、藻体の炭化加工試験および藻体炭化物の予備的な適用評価試験について報告し、利用可能であることを示した<sup>2)</sup>。

本報では、上記の成果をもとに実施した、① 野外排水処理装置を用いた藻類による連続処理試験、② 藻体炭化物の緑化用資材への適用試験、さらに ③ 炭化より容易に資材化できる未加工利用(土壤の肥沃化)の試験に関して報告するとともに、当初の目的をめざしたシステムに関して検討した。

2. 藻類による排水処理に関する検討

藻類を活用した排水処理システムを開発するためには、藻類に適した培養方法を採用し、さらに増殖した微細な藻体を能率良く回収できる方法を確立する必要がある。そこで、健康食品利用で微細藻類（クロレラおよびスピルリナ）を大量培養している藻類生産業での培養法および回収法に関して調査、検討した。続いて、これらの検討結果を踏まえて、有機系排水の処理水を対象とした藻類による排水処理と藻体の回収が可能となる野外排水処理装置を製作し、連続処理試験を行った。

2.1 藻類の培養法と回収法の選定

2.1.1 培養法<sup>3~5)</sup> 藻類生産業で採用されている各培養法の特徴を表-1に示す。培養法は、池培養法とタンク培養法に大別される。池培養法は、水深10~20cmの浅いプールに、各種の無機栄養物で構成される培養液を満し、野外で培養する方法である。また、円形循環池式と還流水路式の違いは、藻体の沈殿防止を目的とした攪拌方法にある。円形循環池式がアーム回転翼を用いて池全体を機械的に攪拌するのに対して、還流水路式は、水車等で一部を攪拌することによって池全体を攪拌できる。タンク培養法は光を必要としない従属栄養型培養であり、池培養法に比べて、培養面積の大幅な縮小および高濃度での培養が可能となるが、有機炭素源（酢酸、糖類等）が必要となる。

以上の内容より排水処理に適用する培養法は、有機炭素源を必要としない池培養法とし、さらに構造的な面から還流水路式が適していると判断した。

2.1.2 回収法<sup>3~5)</sup> 藻類生産業では、遠心分離機またはスクリーン式ろ過機等によって、藻体が濃縮液またはペーストまで濃縮された後、乾燥工程に移されている。システムへの適用に際しては、回収作業の容易性および処理水の清澄性の面から検討する必要がある。そこで、クロレラを対象とした各種回収法の試験を行った。

自然沈降試験では、藻体が分散し清澄な上水が得られないため、凝集剤を用いた凝集沈殿法を検討した。その結果、A1系凝集剤などを組合せて添加することによって、凝集させることができたが、藻体の真比重が小さいためブロックの沈降性が悪く、凝集剤による沈殿分離は難しいと考えられた。続いて、表-2に示すような既存の藻体回収装置に関して、システムへの適用性を検討した。藻体が小さいクロレラの場合、回転ドラム式ろ過機は、凝集剤による前処理が必要となるが、中空糸膜型限外ろ過装置と連続遠心分離機は、培養液から直接回収することができる。ただし、連続遠心分離装置は藻体がペースト状になるため、回収の作業性が悪くなる。また、処理水の清澄性としては、藻体を100%回収できる中空糸膜型限外ろ過装置が最良である。

以上の結果より、排水処理システムの藻体回収法としては、中空糸膜型限外ろ過装置、連続遠心分離機、回転ドラム式ろ過機の適用可能性が示されたが、実用化に際

表-1 藻類生産業における培養法の比較

培養法	培養藻類	光	設置場所	循環方法	特徴	
池培養法	円形循環池式	クロレラ	必要	屋外	アーム回転翼	屋外であるための・季節、天候の影響が大きい・非衛生的 ・池全体の攪拌が必要
	還流水路式	スピルリナ ドナリエラ	必要	屋内	水車	・一部の攪拌により全体の循環が可能 ・形状から設置面積の無駄が軽減可能 ・品質が不安定
タンク培養法	クロレラ	不要	屋内	攪拌機および曝気	・季節、天候の影響なし ・光が不要 ・有機炭素源および曝気が必要 ・品質が安定 ・純粋培養可能	

表-2 藻体回収装置の比較

装置名	分離方式	分離可能な藻類	藻体分離状態	藻体回収の作業性	処理水の清澄性	システムへの適用性
中空糸膜型限外ろ過装置	膜ろ過	クロレラ	濃縮液	○	◎	○
回転ドラム式ろ過機	膜ろ過	スピルリナ ※クロレラ	濃縮液	○	△	○
連続遠心分離機	遠心分離	スピルリナ クロレラ	ペースト状	△	○	○
回転遠心バスケット	遠心分離+膜ろ過	スピルリナ	ペースト状	○	○	×
振動篩別機	膜ろ過	スピルリナ	ペースト状	△	△	×
連続真空ろ過装置	膜ろ過	スピルリナ	ペースト状	○	○	×

優位な順に◎>○>△>×, ※凝集剤を使用した場合可能

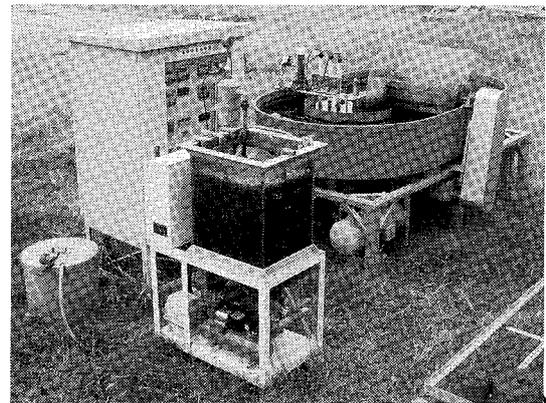


写真-1 野外排水処理装置の全体像

表-3 野外排水処理装置の仕様

藻類培養槽	藻類分離装置	計測制御装置
<ul style="list-style-type: none"> <li>・還流水路式</li> <li>・FRP製, 1,000ℓ</li> <li>・2,500×1,500×400mm</li> <li>・水車型水流発生器付(速度可変型)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・中空糸膜型ろ過</li> <li>・処理能力40ℓ/h</li> <li>・880×520×1,800mm</li> <li>・水位レベル制御機能付</li> <li>・逆洗機能付</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・制御盤</li> <li>800×1,000×1,780mm</li> <li>pH, DO, EC, 濁度表示</li> <li>・センサーのエアジェット洗浄</li> <li>・培養槽の濁度制御</li> </ul>

しては、経済性、利便性の面から選定する必要がある。

2.2 野外排水処理装置による連続処理試験

2.2.1 試験装置 装置の全体像および仕様を写真-1、表-3に示す。装置は基本的に①藻類培養槽、②藻体分離装置、③計測制御装置から構成されている。培養槽は1m<sup>3</sup>の還流水路型水槽とし、十分な照度を水中に確保するために水深は30cmとした。また、藻体の沈殿防止を目的として、水車型攪拌機を用いて水流を発生(流

速約 20 cm/s) させる。原水は、定量ポンプを用いて藻類培養槽に常時供給され、培養槽よりオーバーフローした液は、水位レベル制御によって随時藻体分離装置に送られる。藻体分離装置として、藻体を100%回収するためにこの試験では中空糸膜型限外ろ過装置を使用した。この装置によって、中空糸膜によるろ過・濃縮が自動的に行われ、清澄な処理水と藻体濃縮液とが分離される。計測は、水温、pHなどを自動測定した。

**2.2.2 試験条件** 原水としては浄化槽処理水 (BOD: 13~15 ppm, T-N: 7~12 ppm, T-P: 3~4 ppm) を用い、クロレラによる連続排水処理試験を約400日行った。原水供給量は、培養槽での滞留日数が3~7日の範囲になるように適宜調整した。照度は晴天時に30,000~50,000 (1x), 水温は基本的には自然状態で放置し、15°Cまで低下した時点でヒーター (2 kw) を設置した。

**2.2.3 試験結果および考察**

(1) pH・藻体濃度の変化 試験結果の一部を図-1~5に示す。pHは、変動はあるがほぼ8.5~10を示していた。培養槽内の藻体濃度は、滞留日数7日、水温30°Cでは140~170 ppm、滞留日数5日、16~20°Cでは70~90 ppmであり、80日目付近の水温低下 (10~15°C) に伴って50 ppmまで低下した。また、図中には示していないが、これ以降、夏期の水温上昇に伴って150 ppm付近まで上昇し、さらに滞留日数を4日にした場合、80~100 ppmとなった。ここで、回収された藻体量より藻体生産量を算出すると、滞留日数5日において、夏期が6~9 g-dry/m<sup>2</sup>/日 (藻体濃度 100~150 ppm)、冬期が3~5 g-dry/m<sup>2</sup>/日 (藻体濃度 50~90 ppm) であった。

(2) 窒素除去の状況 上記の変化に伴って、排水中に残存する約8 ppmの窒素を、滞留日数7日では約1 ppmまで低減・維持でき、窒素総供給量に対して83%を除去できることを確認した。また、滞留日数5日では水温低下に伴って、窒素除去率は58%まで低下したが、ヒーター加温による藻体濃度の上昇に伴い、除去率を70%とすることができた。試験全体を通して窒素除去率は、滞留日数5日において、夏期が70~80%、冬期は50%前後であった。また、この際の藻体中の窒素含有量は乾物量当たり6~8%であった。

**3. 土壌改良資材への藻体利用に関する検討**

前回は、藻体炭化物の性状試験および予備的な性能評価試験 (花粉管生長テスト, 発芽試験) を行ったが、今回は、各種植物のポット栽培試験を実施し、性能を評価した。さらに、余剰藻体の炭化利用以外に未加工利用の方法に関しても試験を行った。

**3.1 植物栽培試験 (ポット試験) による藻体炭化物の評価**

**3.1.1 試験概要** 藻体炭化物としては、クロレラの400°C炭化物を用い、砂質土に体積当たり2.5~10%で藻体炭化物を混合、さらに化学肥料 (N: 0.2 g/1ポット) と一部パーク堆肥を添加し、1/10,000aのポットに充填

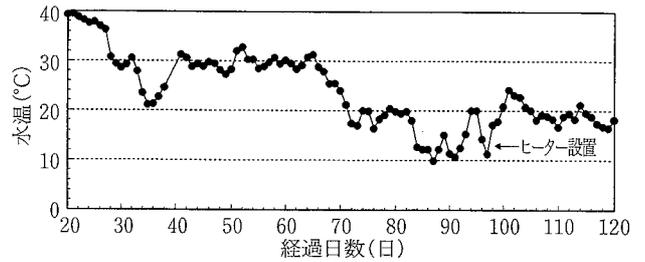


図-1 培養槽の水温変化

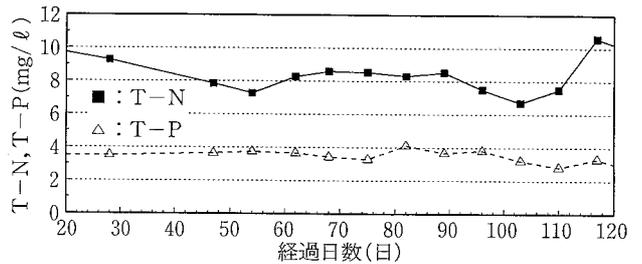


図-2 浄化槽処理水の窒素・リン濃度の変化

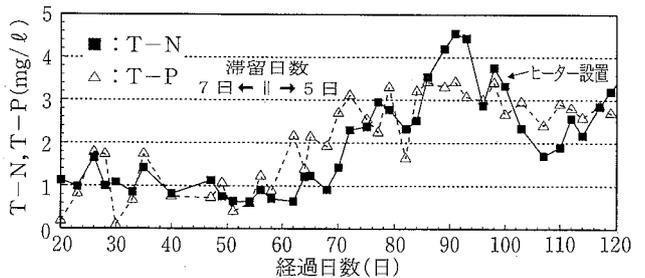


図-3 培養槽の窒素・リン濃度の変化 (ろ液)

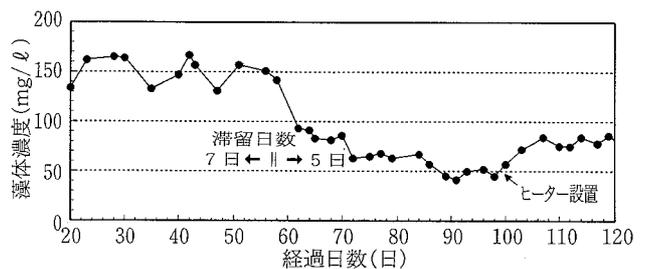


図-4 培養槽の藻体濃度の変化

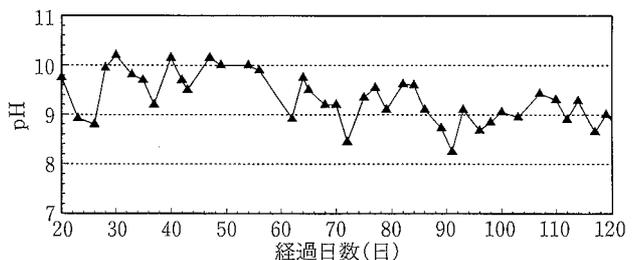


図-5 培養槽の pH の変化

した。供試植物は、大豆、イネ科植物（K31F）を用い、播種後は草丈を測定（1回/週）し、大豆は2カ月経過後、収量調査を行った。K31Fは2カ月後に、一部ポットを解体し根量調査を行い、残りについては、約1カ月ごとに刈取調査を行った。

**3.1.2 試験結果および考察** 播種2カ月後の大豆の収量・根重を図-6、K31Fの収量・根重を図-7に示した。大豆の収量・根重はパーク堆肥併用において、炭化物量2.5～5%の範囲で対照区よりも増加し、また、根粒菌着生量も多くなる傾向を示しており(写真-2)、木炭混合区と同様またはそれ以上の結果が得られた。一方、K31Fの収量・根重においても、炭化物量2.5～5%の範囲でその効果が顕著に現れ、根量、特に細根が対照区に比べ、その増加が確認された(写真-3)。

ところで、大豆に関しては炭化物10%混合区において、播種23日目で下葉より黄変が始まり障害が現れた。土中水を分析した結果、クロレラ炭化物の混合量が増えるほど、土中水の塩類濃度は上昇し、特にリン、カリウムは非常に高い値となった。クロレラ炭化物を10%混合すると、リン等の過剰障害を受けると考えられる。

以上の結果より、砂質土にクロレラ炭化物を2.5～5%混合することは、木炭の一般的な施用効果である物理性の改良および根圏微生物の富化をもたらし、その結果、植物の生育、特に根量を増加させたと考えられる。

**3.2 藻体の未加工利用（土壌の肥沃化）に関する試験**

余剰藻体の土壌改良資材への利用に関しては、藻体炭化物を中心に検討してきたが、現状では炭化に要するエネルギーおよびコストが実用化への負担となる可能性が高い。そこで、より容易な資材化法として、未加工で利用することを検討した。予備的に藻体のコンポスト化試験を行った結果、藻体が易分解性で、かつ肥料成分が非常に高かったことから、藻体を土中へ直接添加し分解させ、肥料源として利用する方法に関して検討した。

**3.2.1 試験概要** 1/2,000 a (10 l) ポットに有機物、肥料成分の少ない砂質土（京都北白川産マサ土）と、クロレラ乾燥物を体積当たり2.5～10%混合し、25°Cの恒温室で養生した。水分状態は、含水比が約10%となるように調整後、毎日80～100ml散水を行った。切り返しは、週に1度の割合で行った。肥沃化土（クロレラ培土）の腐熟度は、温度、土の化学性から評価した。さらに腐熟化が終了したクロレラ培土については、植物栽培試験によって、その性能を評価した。供試植物は、コマツナおよびK31F用い、対照区として、園芸用黒ぼく土およびマサ土を設定した。

**3.2.2 試験結果および考察**

(1) 腐熟化過程 クロレラの腐熟化について、温度、炭素量、可給態窒素量の経時変化を図-8、図-9に示す。マサ土にクロレラを混合し、養生を開始した直後に温度が28～32°C程度に上昇した。また切り直し直後に温度の再上昇が見られたが、ほぼ3週間で安定した。炭素量は、試験開始後徐々に低下し、約50日目には安定した。

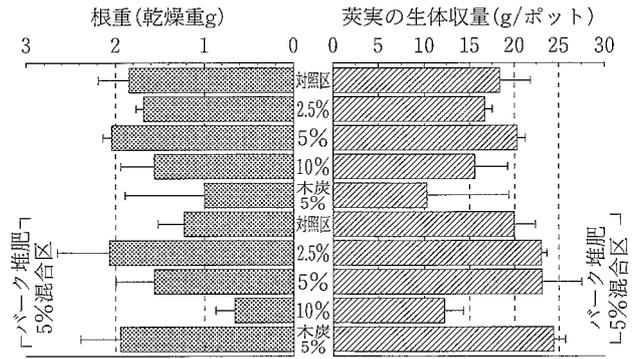


図-6 大豆の収量および根重

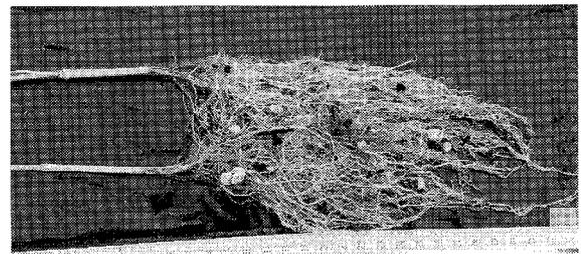


写真-2 大豆の根粒菌着生状況

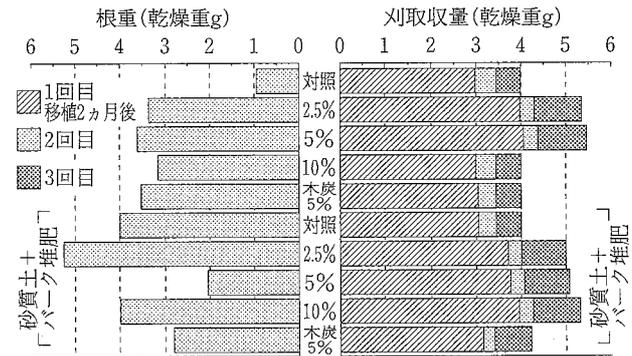


図-7 K31Fの収量および根重

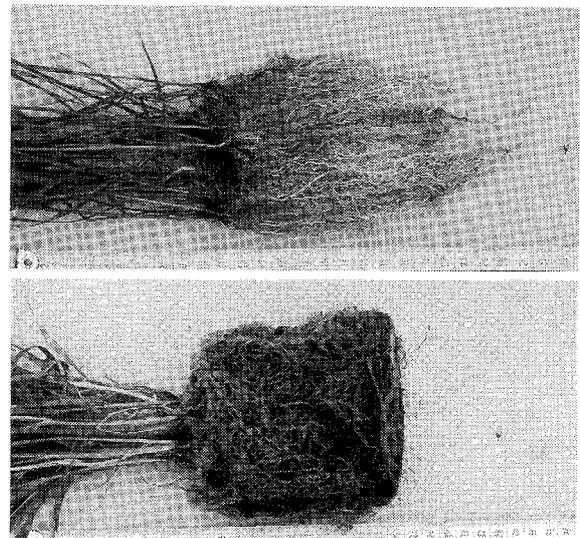


写真-3 K31Fの根の状況

(上：砂のみ、下：砂+クロレラ炭化物5%)

一方、可給態窒素は、アンモニア性窒素量が約1カ月目まで上昇した後低下し、約2カ月で安定した。

したがって、炭素量等の変化から、養生2カ月経過時点で、腐熟化が終了したと判断した<sup>6)</sup>。

(2) クロレラ培土による植物栽培試験 クロレラ混合割合を0.5～5%になるように調整した、養生2カ月後のクロレラ培土を用いて試験を行った。コマツナおよびK31Fの発芽率を表-4に示す。また、播種70日後のコマツナの収量・根重を図-10に、K31Fの収量・根重を図-11に示した。

発芽率は、コマツナにおいて、0.5～1%混合でほぼ100%であったが、2.5%以上においては、0%であった。一方、K31Fにおいては、5%程度の混合でも50%以上あり、草本は、コマツナと比較して可溶性塩類の耐性が強い植物であることがわかった。

初期生育はいずれも、クロレラ混合0.5～1%において対照区に比べ極めて良好であり、それはクロレラ由来の肥料成分によるものと考えられた。ただし、播種1カ月後、一部に肥料不足(N不足)と思われる生育不良が観察されたため、追肥の必要性が示唆された。

ところで、肥沃化以外の効果として、肥沃化過程で藻体中の炭素分の一部が土中に残り、土の物理化学性(団粒化、保水性、緩衝能力)、微生物生育環境が改良されることが上げられる。実測値を参考に概算した場合、肥沃化のサイクルを10回程度繰返すことによって、森林土壌の表層に相当する炭素量まで有機化することができる。

以上の結果より、生藻体を貧栄養な土壌に混合し、約2カ月腐熟化させることで肥沃化できることがわかった。また、その適正量は、塩類障害の面から約1%であることが分かった。

#### 4. 地球環境への負荷低減に貢献するトータルシステムの検討

本研究開発の目指すところは、有機系排水の処理水中に含まれる有用物(窒素・リン等)を利用して、微細藻類を培養し、処理水のさらなる浄化を図ると共に、回収した余剰微生物体を有効利用するトータルシステムの構築にある。このシステムを幅広く普及させることで、直接または間接的に環境保全に貢献することができる。

そこで、各技術の適用に関して検討を行ってきたが、まず、排水処理において、対象となる有機系排水は、余剰微生物体のリサイクルの面から重金属等の有害物質を含まないこと、さらに排水処理水による藻類培養および栄養塩除去を両立させるためにも生活系排水が適していると判断される。

続いて、余剰藻体の資材化に関して、検討してきた各資材化の特徴等の比較を表-5に示す。炭化およびコンポスト化と比較して、土壌の肥沃化への利用は、土壌に直接、藻体濃縮液または脱水ケーキを添加できるため、余分な工程および施設が不要となり、資材化に要するコスト・エネルギーの低減が図れるという利点がある。し

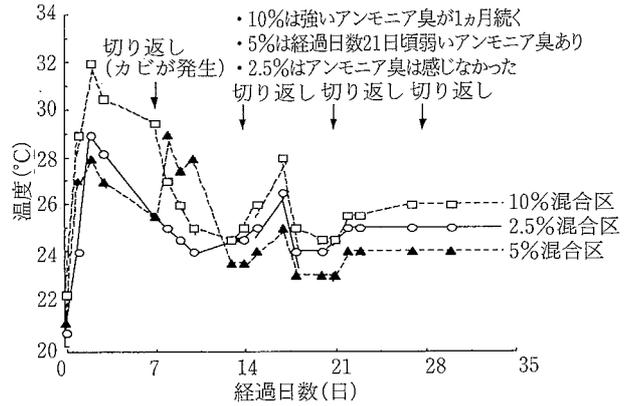


図-8 クロレラ培土の温度変化

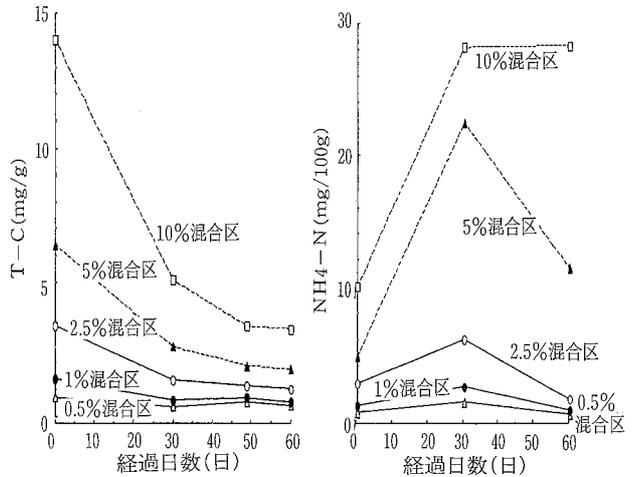


図-9 クロレラ培土の炭素・可給態窒素量の変化

表-4 クロレラ培土による発芽試験結果

	コマツナ	K31F
クロレラ0.5%混合	96.67	95.67
クロレラ1%混合	98.33	95.67
クロレラ2.5%混合	0.00	51.27
クロレラ5%混合	0.00	63.33
対照区(マサ土)	98.33	92.33
対照区(黒ぼく土)	96.67	100.00

\* 播種8日後

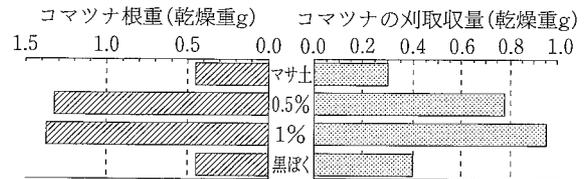


図-10 コマツナの収量および根重

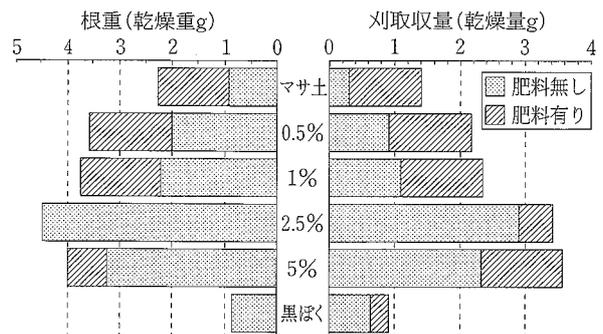


図-11 K31Fの収量および根重

表-5 余剰藻体の各資材化法の特徴比較

資材化方法	利用目的	資材化に関する要素					資材の消費性	備考	
		原料の性状	必要日数	エネルギー消費	コスト	臭気			
加工	炭化	脱水ケーキ or 乾燥物	1~2日	×	×	×	○	炭化過程の臭気大 臭気除去施設必要	
	コンポスト化	土壌改良 肥料	濃縮液 or 脱水ケーキ	約2カ月	△	△	△	○	コンポスト化初期に臭気発生 (常時好気状態→臭気少) 副資材により容量大
未加工	肥沃化利用	土壌改良 肥料	濃縮液 or 脱水ケーキ	約2カ月	○	○	△	◎	肥沃化初期の耕耘時に 臭気発生

※優位な順に◎>○>△>×

たがって、農業用・緑化用の資材化方法としては、未加工利用法の土壌の肥沃化が適していると判断される。

以上の内容より、上記目的をめざしたトータルシステムの概要を示すと図-12の通りとなる。生活系排水を活性汚泥等で処理した処理水を利用して藻類を培養し、排水をさらに浄化するとともに、発生した藻体濃縮液を直接未耕地土に散布する。これを2回/月程度切り返しを行い、約50日間養生することによって、未耕地土を肥沃化・有機化し、緑地・農地として活用、拡張していくシステムである。ただし、3.2で述べたように、森林土壌の表層程度の有機化を図るためには、上記サイクルを10回程度行う必要がある。

上記のシステムの適用場所として、気候的には太陽光が豊富に得られ、気温が高く、地理的にはある程度近代化され人口が集中している都市とその近郊に未耕地を有する地域が最適と判断される。さらに、これらの条件を満たす場所として、中東地域等の半乾燥地帯が考えられた。

ここで、生活系排水の発生量を250 l/日/人<sup>7)</sup>、排水処理水中の窒素濃度20 mg/l、藻体生産量を6 g-dry/m<sup>2</sup>/日(夏期)、窒素除去率を80%とした場合の窒素収支より、藻類培養槽の必要面積を概算すると、1人当たり約6 m<sup>2</sup>となる。一方、肥沃化に必要な土地面積は、肥沃化・栽培サイクルを4カ月とした場合、1人当たり約7 m<sup>2</sup>/人となる。したがって、人口1万人の都市を想定した場合、藻類培養槽の設置および肥沃化に必要な土地総面積は0.13 km<sup>2</sup>となる。

### 5. まとめ

本報は最終報告として、藻類による排水処理試験と資材化試験の結果を報告し、そのトータルシステムに関して検討した。以下に明らかになった内容を示す。

① 浄化槽処理水を対象とした藻類による連続排水処理試験の結果、水温20~25°C、滞留日数5日での窒素除去率は70~80%、藻体生産量は6~9 g-dry/m<sup>2</sup>/日であることを確認できた。

② 藻体炭化物の土壌改良資材への適用に関して検討した結果、植物が良好に生育するための適正混合量は容積比で2.5~5%であることを確認できた。

③ 藻体の未加工利用に関して検討した結果、生藻体を貧栄養な土壌に直接添加し、約2カ月腐熟化させるこ

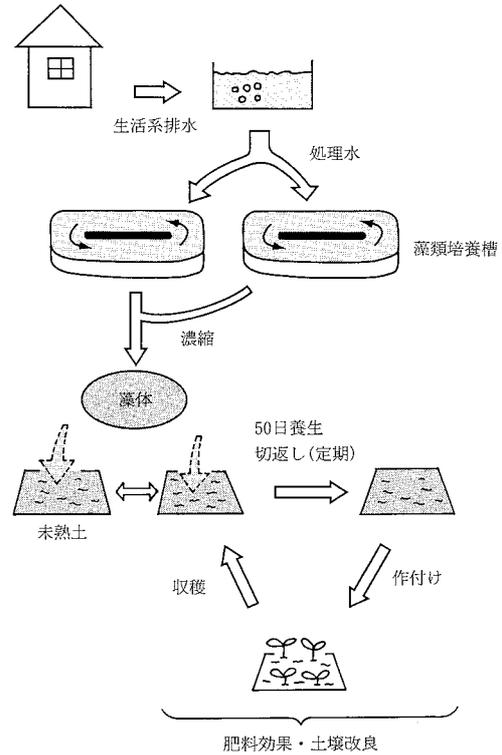


図-12 藻類による排水処理と資材化のトータルシステムの概要図

とで土を肥沃化でき、その適正混合量は、容積比で約1%であることを確認できた。

④ 以上の成果より、生活系排水を活性汚泥等で処理した処理水を利用して藻類を培養し、排水をさらに浄化するとともに、余剰藻体を直接未耕地土に添加し、肥沃化・有機化することで、緑地・農地として活用、拡張していくトータルシステムを提案した。

今後は、上記システムの小規模実証試験を実施し、内容を充実させていくとともに、適用地域を拡大できるように各技術の改良を行っていきたいと考えている。

### 参考文献

- 1) 加藤，他：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），大林組技術研究所報，No. 48，p. 155~162，(1994)
- 2) 北村，他：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2），大林組技術研究所報，No. 49，p. 125~128，(1994)
- 3) 西澤一俊，他：藻類研究法，共立出版，p. 257~264，(1979)
- 4) 山口勝己：微細藻類の利用，恒星社厚生閣，p. 18~53，(1992)
- 5) 島松秀典：微細食用藻スピリリナの量産 [上]，BIO-INDUSTRY，Vol. 3，No. 5，p. 377~383，(1986)
- 6) 藤原俊六郎：堆肥づくりの手順，農文協，p. 150~158，(1987)
- 7) 日本建築センター：尿尿浄化槽の構造基準・同解説，新洋社，p. 309，(1984)