

# 下水道資源を用いた微細藻類培養技術とそのエネルギー化

山崎廉予・重村浩之

## 1. はじめに

近年、下水道事業における気候変動緩和策の一つとして、下水道資源を活用した微細藻類培養技術や、培養した微細藻類によるエネルギー生産技術が着目されており、各機関で研究が盛んに行われている。

下水道事業において、温室効果ガス排出量削減に貢献できる項目の一つとして、下水道資源（下水汚泥、下水熱、空間、栄養塩、再生水等）の有効利用による排出量の削減が挙げられる。微細藻類の培養では、これらの下水道資源が活用可能であり（図-1）、下水処理場は、微細藻類培養には最適な環境といえる。また、培養した微細藻類は、嫌気性消化（メタン生成菌の働きによりバイオガス（メタンガス）に変換してエネルギーを得る方法）によるエネルギー回収が可能であり、下水処理場で培養した微細藻類は、有効利用がしやすいという利点もある。

本稿では、下水道事業における気候変動緩和技術の一つとして有望と考えている下水処理場における微細藻類の活用技術について、土木研究所の取組を紹介する。

## 2. 下水道資源を用いた微細藻類培養

藻類は、その多くは植物と同様、太陽の光エネルギーを利用して光合成を行い、CO<sub>2</sub>を固定し、デンプン等の有機物を合成し、酸素を生成して放出する。大気中のCO<sub>2</sub>濃度が90%を超えていた原始地球において、CO<sub>2</sub>を固定し、酸素に変換したのは海洋の藻類であるとされている。ことからわかるように、藻類はCO<sub>2</sub>固定に優れている生物である。また藻類は、他の陸上植物と比較して増殖速度が速く、特に微細藻類は、液体中で分散して培養できるため、細菌類等と同様に工業的に扱いやすい特徴を持っている。

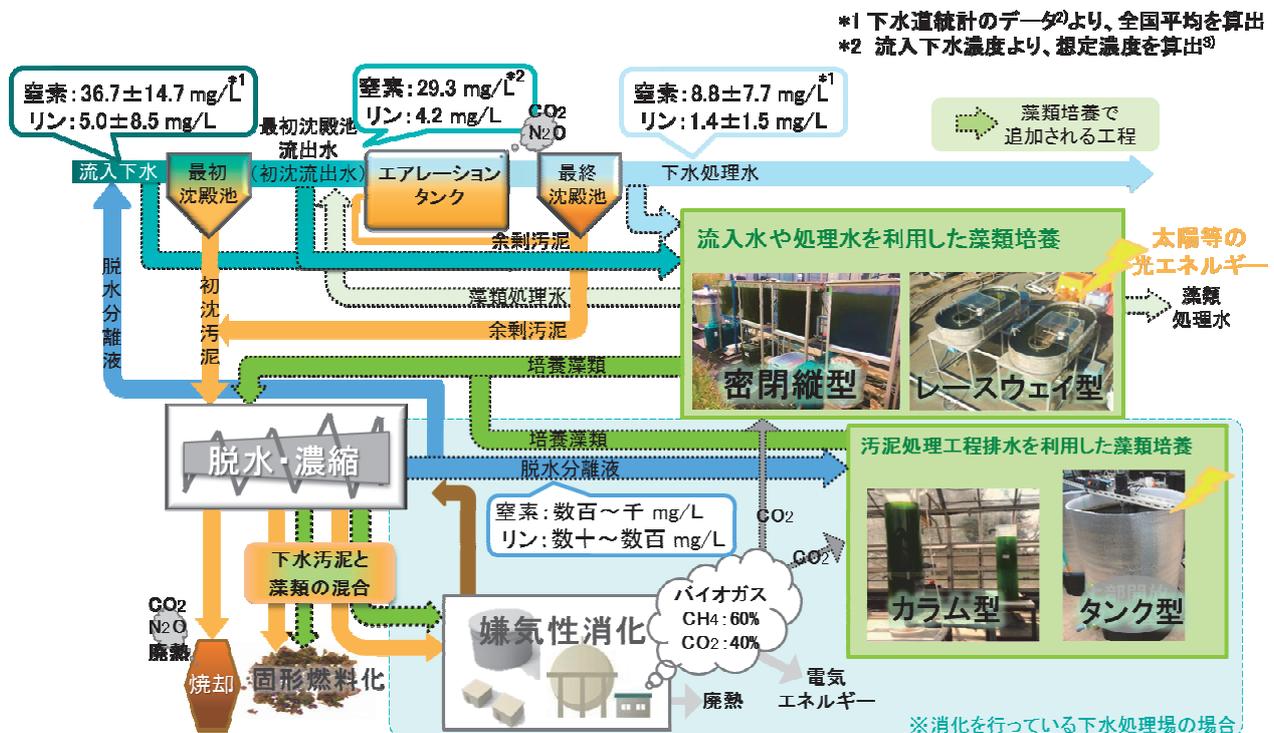


図-1 下水処理場における下水処理フローの一例および下水道資源を用いた微細藻類培養を導入した場合の想定フロー図

藻類の増殖に必要な成分としては、窒素やリンなどの栄養塩類が挙げられる。下水処理場では、下水流入水や、下水流入水を最初に沈殿させる最初沈殿池の流出水（以下「初沈流出水」という。）、下水処理水、下水汚泥の脱水後のろ液（以下「脱水分離液」という。）に含まれるリンや窒素などの栄養塩類を微細藻類培養に利用可能である（図-1）。環境中に存在するCO<sub>2</sub>を取り込むことで微細藻類は増殖可能であるが、下水処理場では、下水処理過程や嫌気性消化、焼却時にCO<sub>2</sub>が発生しており、これらを回収して微細藻類培養に有効利用することも可能である。

下水道資源を活用して培養した微細藻類は、含水率が99%以上であり、下水汚泥と同様、濃縮して嫌気性消化することにより、メタンガスの発生量の増加に貢献できる。発生したメタンガスは、ガスエンジンやガスボイラー等で電気・熱エネルギーとして回収し、利用可能である。また、培養藻類の脱水にエネルギーは掛かるが、固形燃料化し、石炭代替燃料として利用できる可能性も持っている。

このように、下水道資源を活用して培養した微細藻類から回収したエネルギーにより、下水道施設内外における電気、化石燃料の使用量を削減することで、直接的あるいは間接的に温室効果ガス排出量の削減に貢献できる可能性を秘めている。

### 3. 各下水処理工程の水を用いた自然発生型微細藻類培養実験とエネルギー化の検証

土木研究所は、A下水処理場の敷地内に設置された実下水を連続的に利用可能な実験施設での実験が可能な体制にあり、そこで下水道に関わる継続的な実験を行っている。本研究室では、上記施設等を利用し、初沈流出水、下水処理水、脱水分離液等の下水処理場の各工程水を用いた自然発生型微細藻類培養技術の研究を行ってきた<sup>4),5),6)</sup>。各工程水は、含まれる栄養塩濃度等の条件が異なる（図-1）。下水処理水は、下水処理工程中で窒素、リン濃度が最も低い水であり、全国平均で見ると、初沈流出水の3分の1程度である。脱水分離液の窒素、リン濃度は、数十～数千mg/L程度と高く、嫌気性消化槽の有無によっても濃度に大きな差がある。また、それぞれの下水処理場において、利用可能な、または活用したいと考えてい

る工程水や下水道資源の種類が異なったり、活用できる敷地面積も異なることが想定される。下水処理場での微細藻類培養システムの導入の幅を広げるために、下水処理場の各工程水において、それぞれが利用可能な微細藻類培養技術の開発が重要となる。

#### 3.1 最初沈殿池流出水および下水汚泥を用いた微細藻類培養における培養量増量の検討

初沈流出水を用いた藻類培養実験<sup>4)</sup>では、380Lの上部開放レースウェイ型藻類培養装置（図-2）を用いた。レースウェイ型培養槽は、深さ0.2～1m程度の浅い槽が基本であり、効率的に微細藻類へ光エネルギーの供給が可能である。培養の餌には、A下水処理場の初沈流出水、およびA下水処理場の標準活性汚泥法の余剰汚泥を用いた。余剰汚泥は、水処理に最適な細菌群の塊であり、微細藻類のみでは除去が難しい有機物の除去や、沈降性の向上のために混合した。系列1では、初沈流出水に余剰汚泥を一定量に混合したものを基質とし、系列2では、初沈流出水のみを基質とし、自然光下で、自然発生する微細藻類の培養を行った。HRT（Hydraulic Retention Time：水理学的滞留時間）は2～4日で、連続式培養を行った。pHを8.0に制御しながら、純炭酸ガスボンベでCO<sub>2</sub>を供給した。冬季の期間は、一年を通して水温が安定している下水処理水の熱を活用し、培養槽内に流すことで、培養槽の保温を行った。培養槽の後段には、32Lの沈殿槽を設置し、重力濃縮により沈殿藻類の回収を行った。

系列1および2の培養槽および排水のSS（Suspended Solids）を図-3に示す。SSは、環境



図-2 上部開放レースウェイ型藻類培養装置(380L)

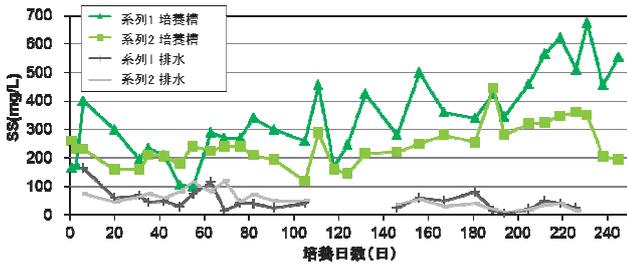


図-3 微細藻類培養槽および排水のSS

基準や排水基準では水中の浮遊物質を示す指標であり、ここでは、培養槽中の藻類や微生物を含む浮遊物質の濃度の指標として用いている。培養槽のSSは、冬季も含め、培養期間中はほぼ200 mg/L以上で培養が維持できた。培養液1mLあたりの微細藻類の細胞数は、冬季の計測において、系列1が系列2の1.4倍検出され、余剰汚泥を添加することで、より微細藻類の細胞数が増えることが確認できた。

図-4に、嫌気性消化槽へ培養藻類を投入した際の効果を確認するために行った、中温条件(35℃)のメタンガス発生ポテンシャル試験の結果を示す。冬季において、系列2の微細藻類を添加した系と比較して、系列1を添加した場合のメタンガス発生量は、1.2~1.5倍高かった。消化汚泥に下水汚泥のみを添加し、下水汚泥をメタン生成菌の餌とした系と、系列1の微細藻類を添加した系を比較すると、余剰汚泥を添加して培養した系列1で、投入した有機物あたりのメタンガス発生量が高くなることが示された。系列2の微細藻類を添加した系では、下水汚泥のみを添加した系と比較して、投入した有機物あたりのメタンガス発生量が同等であったため、余剰汚泥を添加せず、初沈流出水のみで培養した系の微細藻類のメタンガス発生ポテンシャルは、下水汚泥と同程度であると考えられる。下水汚泥と系列2の微細藻類を添加した系では、メタンガス発生量が低くなってしまったが、これは技術的なミスが想定されたため、今後も引き続き分析が必要である。

培養藻類中のエネルギーポテンシャルを示す乾燥物の高位発熱量は、系列1で16.4MJ/kg、系列2で18.4MJ/kg程度であった。石炭の高位発熱量(25~30MJ/kg)には及ばないものの、未消化の下水汚泥の乾燥物(16~20MJ/kg)と同

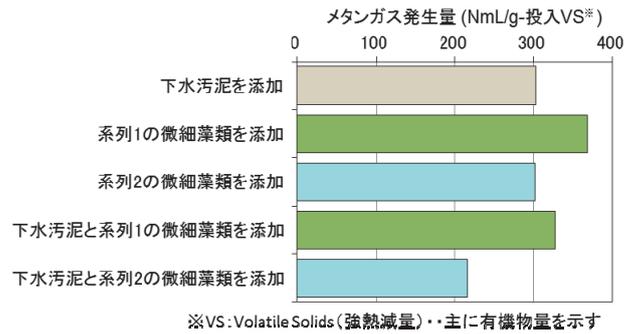


図-4 メタンガス発生ポテンシャル試験の結果

程度であり、固形燃料化への適用可能性が考えられる結果であった。

初沈流出水や余剰汚泥を活用した微細藻類培養では、混在する動物プランクトンや細菌類による捕食や餌の競合による、微細藻類培養量の減少が懸念される点が課題として挙げられ、培養槽中の生態系を維持する運転管理が重要となる。

### 3.2 下水処理水を用いた形状が異なる藻類培養槽での微細藻類培養とエネルギー化の試算

#### 3.2.1 下水処理水を用いた上部開放レースウェイ型藻類培養槽での微細藻類培養

下水処理水を用いた微細藻類培養においても、上部開放レースウェイ培養槽を用いた実験を行った。A下水処理場の流入下水を標準活性汚泥法処理装置(酸素がある好気的な条件で有機物等の分解を行う細菌類等を活用した、標準的な下水処理方法)で連続的に処理した下水処理水を餌として、自然光下で、自然発生する微細藻類を培養した。HRTは4日とし、pHを8.0に制御しながら、純炭酸ガスボンベでCO<sub>2</sub>を添加する系としない系で比較培養を行った。

8月、9月の夏季の培養槽中のSSは、中央値で206および166mg/Lであり、安定した培養が行えた。培養藻類中の乾燥物の高位発熱量は、CO<sub>2</sub>を添加する系で16.4MJ/kgとなり、CO<sub>2</sub>を添加していない系と比較して1.3~1.4倍多く、CO<sub>2</sub>添加効果が示された。自然発生した微細藻類の脂質含有量は1.0~5.4%であり、脂質を蓄積する微細藻類の脂質含有量とされる15~70%と比較して低く、バイオ燃料等として活用するよりも、微細藻類の全細胞を用いた嫌気性消化によるエネルギー生産の方が適していることが明らかとなった<sup>5)</sup>。

### 3.2.2 下水処理水を用いた密閉縦型藻類培養槽での微細藻類培養

レースウェイ培養槽は、微細藻類が光エネルギーを効率的に活用できるメリットがある一方、広大な敷地面積を必要とするデメリットがある。使用敷地面積の削減を一つの目的として、密閉した縦型藻類培養装置において、培養が容易な下水処理水を利用した藻類培養実験を、国土交通省の受託研究（GAIAプロジェクト、下水道応用研究）において実施した<sup>6)</sup>。

B下水処理場の屋外に設置した密閉縦型藻類培養装置において、B下水処理場の塩素混和池通過後の下水処理水を餌として、自然発生する微細藻類の培養実験を行った。培養槽に流入するまでに塩素はほぼなくなっており、本研究においては、微細藻類培養への塩素の影響は見られなかった。

培養槽は、有効容積50Lの槽を4連続させた200L槽を用いた（図-5）。本システム全体の概要図を図-6に示す。小スケールの培養槽を複数連結させることで、培養量の調整が可能であり、設置場所の敷地面積に合わせた藻類培養が可能になると考えている。設置場所は、下水処理場内の建物の壁や外壁等の屋外を想定し、降雨等の天候の影響を排除する目的で蓋をした密閉型とした。HRTは0.8～2日で、連続式培養とした。バイオガスから膜分離装置により回収したCO<sub>2</sub>を、pHを8に制御しながら供給した。冬季は、下水処理水から熱交換器により回収した熱を活用し培養槽の保温を行った。培養槽の後段には有効容積90Lの沈殿槽



図-5 密閉縦型藻類培養装置(50L×4連)

を設置した。下水処理水を用いた微細藻類培養では、下水処理工程が終了した放流前の水を用いることから、微細藻類を全量回収し、排水基準を満たす水質で排水できることが望ましい。本研究では、沈殿槽において重力濃縮により培養藻類の大部分を回収し、沈殿槽から流出してしまう浮遊藻類は、ディスクセパレーターによる機械濃縮により回収するものと想定した。ポンプ、各槽の攪拌機等の動力は、実験施設に設置してある消化ガス発電機より供給した。

培養槽への流入水（下水処理水）、第1槽から第4槽の培養液、排水のSSについて、7月から9月の夏季の平均値を図-7に示す。流入水（下水処理水）のSSは約10mg/Lであるが、藻類が培養されたことで、培養槽のSSは200mg/L程度になり、後段槽になるにつれ、高くなる傾向を示した。また、培養槽を密閉型にすることで、上部開放型よりも、短いHRTで同等の培養が可能であった。

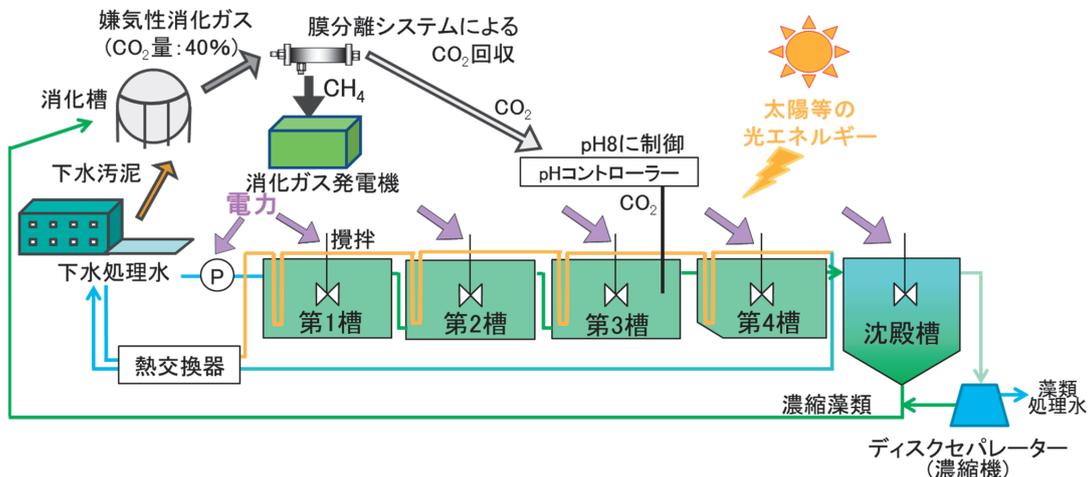


図-6 密閉縦型藻類培養槽を用いた微細藻類培養システムの全体概要

培養藻類の高位発熱量は、21.2MJ/kg程度であり、未消化の下水汚泥と同程度であった。

下水処理場での微細藻類培養システムの導入において、消化ガスから分離したCO<sub>2</sub>を全量使用したと仮定した試算結果(図-8)では、微細藻類培養に掛かる消費エネルギーは5,028.9MJ/日、微細藻類培養を投入した嫌気性消化により得られる生産エネルギーは6,198.7MJ/日であり、1,169.7MJ/日のエネルギーが回収できる試算となった。下水処理場における微細藻類培養および嫌気性消化への投入により、エネルギー生産が可能であることが示された。密閉縦型培養槽は、高さを1~2mにすることで、レースウェイの1/10程度の省スペース化も可能であり、培養期間の短縮が見込める点でメリットがある。一方、培養槽構造の複雑さから、製造や維持管理等のコスト面に課題がある。

### 3.3 脱水分離液を希釈して用いた微細藻類培養および嫌気性消化への投入効果

脱水分離液は、窒素やリン濃度が他の水と比較して高く、微細藻類の培養に有利と考えられるが、脱水分離液中に含まれる塩化物等が微細藻類の培養を阻害する等の理由から、希釈して培養に用い

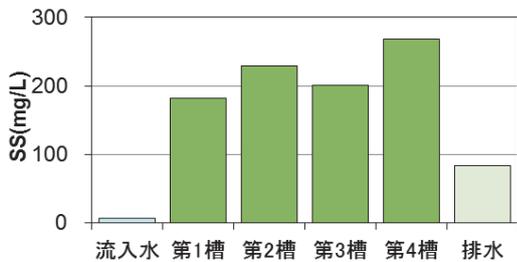


図-7 微細藻類培養状況

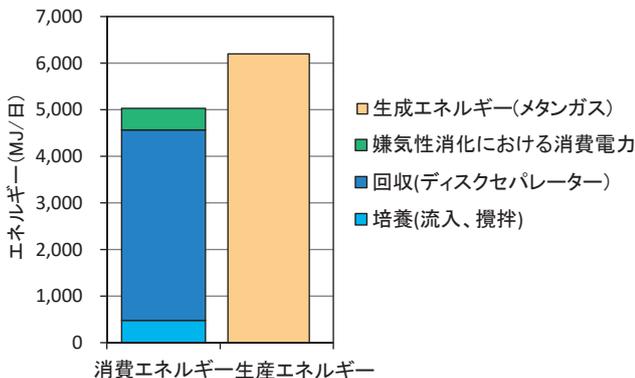


図-8 微細藻類培養システム導入時のエネルギー収支

られることが多い。ここでも、希釈した脱水分離液を餌として、微細藻類培養を行った例を紹介する。

脱水分離液はC下水処理場で採取し、希釈水は、A下水処理場の流入下水を最初沈殿池実験装置で処理した初沈流出水を、浮遊物質の低減、栄養塩類の可溶化、溶解性有機物の低減を目的とした部分循環式嫌気性ろ床実験装置(酸素がない嫌気条件で有機物を分解する細菌類を保持したろ材を、下部に充填した実験装置)にて処理を行った処理水(以下「嫌気性ろ床流出水」という。)を用いた。溶解性リン濃度が4mg/Lになるように、脱水分離液を嫌気性ろ床流出水で約25倍に希釈した。HRTが16.8日の回分式培養で行なった。これは、前回培養した微細藻類24Lを回収し、6Lを次の培養の種として残し、24Lの基質を投入して14日間培養するという工程を繰り返す培養方法である。微細藻類培養は、光エネルギーを円柱の側面から効率的に取り込める、30Lの上部開放カラム型藻類培養装置(図-9)を用い、土木研究所内に設置した温室で実施した。

培養液のSSは、培養開始時で平均して63mg/Lであったが、14日間の培養終了時で242mg/Lまで増加した。嫌気性消化槽へ培養藻類を投入した際の効果を確認するために、中温条件(35℃)にてメタンガス発生ポテンシャル試験を行った。

投入有機物あたりのメタンガス発生量は、下水汚泥のみを添加した系で、283NmL/g-VSであり、下水汚泥と培養藻類を添加した系で、383NmL/g-VSであった。嫌気性消化において、脱水



図-9 上部開放カラム型藻類培養装置(30L)

分離液を希釈して培養した微細藻類を下水汚泥に混合することで、得られるエネルギー量が増加することが示された。培養藻類の乾燥物の高位発熱量は18.0～22.4MJ/kgの範囲であり、未消化の下水汚泥と同程度であった。

本研究では、塩化物等の影響が排除でき、溶解性リンがほぼ全量微細藻類に利用される条件で培養したため、希釈率が高く、長期間での培養であった。脱水分離液は、下水処理工程の一部の水であるため、微細藻類培養の排水を下水処理工程に戻すことが可能であり、排水に求められる水質基準は、下水処理水での微細藻類培養と比較して厳しくない。脱水分離液の希釈割合と微細藻類の培養量、培養期間と排水の水質、エネルギー回収量のすべてが最大限活用できる培養条件の確立が重要となる。

#### 4. まとめ

本稿では、下水道事業における気候変動緩和技術の一つとして有望と考えている下水処理場における微細藻類の活用技術について、土木研究所の取組を紹介した。

初沈流出水および余剰汚泥を用いた微細藻類培養では、上部開放レースウェイ型培養槽において、余剰汚泥の添加により藻類培養量の増加が見込まれることを示した。下水処理水を用いた微細藻類培養では、上部開放レースウェイ型および密閉縦型培養槽において、CO<sub>2</sub>添加の有用性および微細藻類培養システム導入時のエネルギー生産の可能性を示した。脱水分離液を用いた微細藻類培養では、カラム型培養槽において、希釈水の有効性を示した。

各培養藻類は、嫌気性消化への投入によるエネルギー回収量の増加の可能性や未消化の下水汚泥と同程度の高位発熱量を持つことを示した。

このように、下水処理場における微細藻類の活用は、下水道事業における気候変動緩和策技術の一つとして有望であると考えられる。しかし、それぞれの工程水を用いた培養方法において、課題も残っており、敷地面積や培養速度等の培養技術面の解決、維持管理技術等の蓄積により、微細藻類培養技術が下水処理場で実用化されるよう取り組んでいきたい。

#### 謝 辞

本研究の一部は、2015年度から2017年度に行った国土交通省・下水道技術研究開発（GAIAプロジェクト）「下水道資源・エネルギーを最大限に活用した希少水草栽培および微細藻類培養・エネルギー生産」および2018年度から2020年度に行った下水道応用研究「官民連携による下水道資源・エネルギーを活かした植物栽培技術の研究」による助成のもとで行った。また、A、C下水処理場の皆様には、下水流入水、脱水分離液および下水汚泥の採取において、B下水処理場の皆様には、藻類培養実験実施において多大なるご協力を頂いた。ここに記して、謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 岡村好子：小さな生き物の大きな仕事、生物工学会誌、No.91、Vol.3、2013
- 2) 日本下水道協会：下水道統計（平成29年度）、2019
- 3) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部：既存施設を活用した段階的の高度処理の普及ガイドライン（案）、2015
- 4) Yamasaki, Y. and Shigemura, H. : Natural microalgal cultivation systems using primary effluent and excess sludge, Environmental Technology, Apr 22:1-13, 2020
- 5) 土木研究所：平成27年度下水道関係調査研究年次報告書集、土木研究所資料第4347号、2017
- 6) 山崎廉予：下水道資源・エネルギーを活用した微細藻類培養・エネルギー生産技術の紹介、再生と利用、Vol.44、No.163、2020
- 7) 土木研究所：平成30年度下水道関係調査研究年次報告書集、2020

山崎廉予



土木研究所先端材料資源  
研究センター材料資源研  
究グループ資源循環担当  
研究員、博士（工学）  
Dr. YAMASAKI Yukiyo

重村浩之



土木研究所先端材料資源  
研究センター材料資源研  
究グループ資源循環担当  
上席研究員  
SHIGEMURA Hiroyuki