

下水処理場における培養微細藻類量の予測ツールの開発

高部祐剛・南山瑞彦

1. はじめに

1.1 背景

下水道事業では多くのエネルギーを使用し、多量の温室効果ガスを排出している。下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン改訂版¹⁾においては、下水汚泥エネルギー化率を2010年の約13%から2016年度で約29%、下水道での温室効果ガス排出削減量を2009年の約129万t-CO₂/年から2016年度で約246万t-CO₂/年とする目標が掲げられており、下水道に集約される有機物、栄養塩を資源と捉え、下水処理場を核とした地域におけるエネルギー対策と地球温暖化対策に積極的に取り組む必要がある¹⁾。

近年、新たなバイオマスとして、微細藻類（以下「藻類」という。）に注目が集まっている。藻類は、エネルギー生産効率が高く（例：単位面積でのオイル生産量がトウモロコシの約340倍）、食物と競合しないといった利点を有する。一方、藻類培養の際、細胞を構成する窒素、リン等の栄養塩が必要となるが、栄養塩添加に要するコスト削減が課題である。そこで、都市下水に豊富に含まれる栄養塩を藻類培養のための資源として利用した、下水処理場での藻類培養・エネルギー生産技術の開発が期待されている²⁾。さらに、藻類培養には炭素源としてCO₂も必要となるが、下水処理場から発生するCO₂を活用することで、下水道事業での温室効果ガス削減にも寄与できる可能性が考えられる。

藻類は、種によってオイルの生産能力が異なることから、高いオイル生産能力を有する特定の藻類（例：*Botryococcus braunii*）を下水処理水に添加し、培養を試みる研究がラボレベルで行われている³⁾。しかし、他の生物が混在する実下水において、意図した特定の藻類の培養には多くの困難が伴うと考えられる。

1.2 土木研究所での取組

土木研究所では、特定の藻類の添加は行わず、

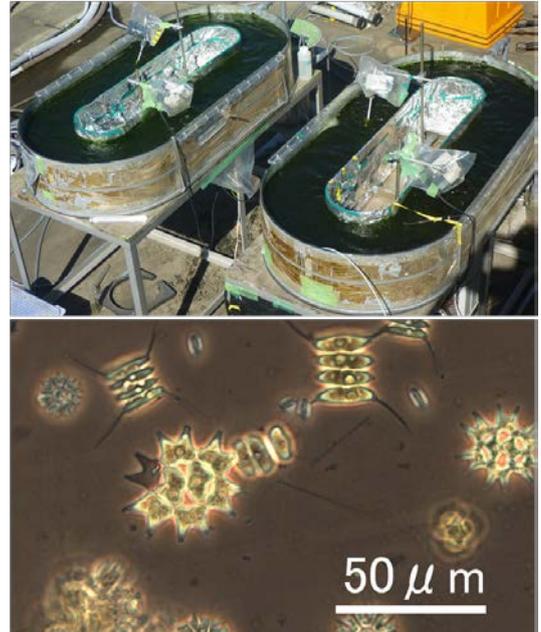


図-1 藻類培養装置及び培養された土着藻類

下水処理水を藻類培養液として用い、与えられた環境条件において優占する藻類（土着藻類、図-1）に着目した。そして、下水処理水中栄養塩、消化ガス由来CO₂といった下水処理場が有する資源を活用した藻類培養・エネルギー生産技術の構築及びその普及支援を最終目的として、ラボレベルでの土着藻類培養手法の検討を行った⁴⁾。本技術の実用化に向けては、太陽光を利用することで低コストな培養が期待できる屋外での藻類培養実証実験が必要である。また、普及支援に際して、藻類培養システム導入を検討している下水処理場における培養藻類量の見込みを予測するツールが必要となる。培養藻類量は、水温、日射量、降雨といった自然環境の変化、水質の変動といった因子が複雑かつ相互に関係し影響が及ぼされるため、その予測には、これらの因子を考慮した数理モデルを構築・利用することが有効である。

1.3 本研究での目的・方法

本研究では、下水処理場における培養藻類量の予測による導入検討の支援を目的として、屋外藻類培養実験を行い、培養状況の把握を行った。その上で、培養藻類量を予測するための数理モデル

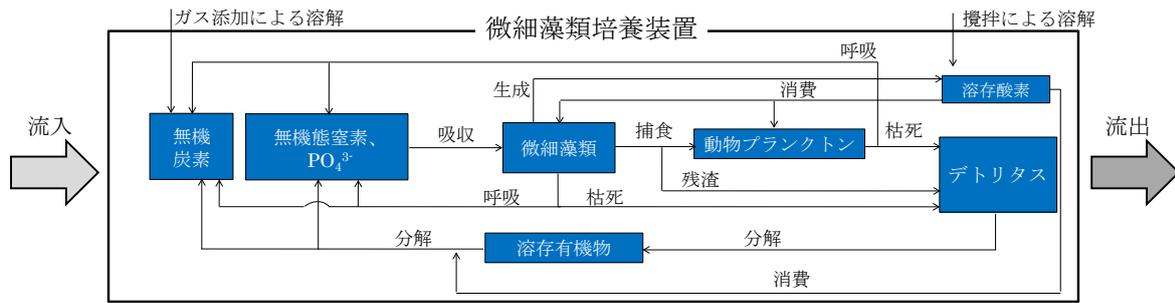


図-2 数理モデルの概念図

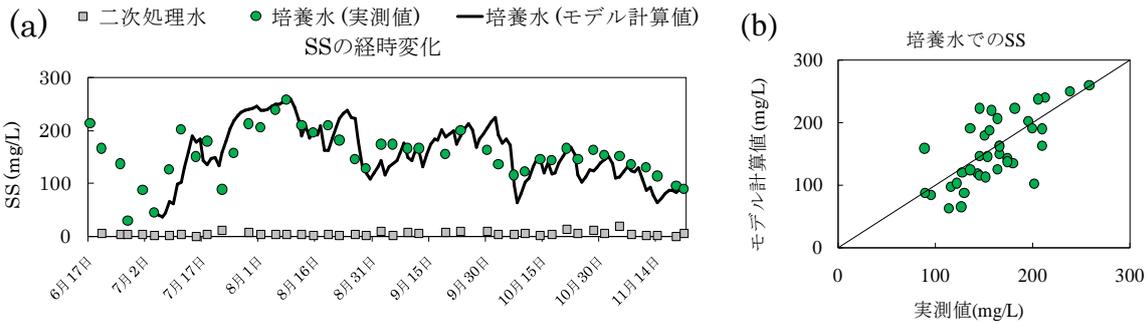


図-3 (a)二次処理水および培養水(実測値およびモデル計算値)でのSSの経時変化、(b)培養水中SSの実測値およびモデル計算値での相関

を構築し、実験データを用いて、数理モデルによる計算値の再現性を評価した。

2. 実験方法及び数理モデルの構築

2.1 藻類培養実験

A下水処理場の屋外に設置したレースウェイ型培養装置(図-1)で藻類培養を行った。なお、レースウェイ型培養装置は、藻類生産性、エネルギー収支の観点で、屋外培養の実用化に適していることが示されている⁵⁾。流入下水を活性汚泥法処理装置(曝気槽容量:100L、水理学的滞留時間(HRT):6時間)で連続的に処理して得た二次処理水を、培養装置でのHRTが4日となるよう連続的に流入させた。装置内藻類が太陽光と均一に接触するよう、培養水はプロペラ型攪拌機で攪拌した。藻類への炭素源供給を目的に、既往研究での操作に従い⁶⁾、培養槽中pHが8に達した時にガスポンベによりCO₂を添加し、pHが約7.7に低下した時に添加を停止した。CO₂添加を2014年6月6日より開始し、2014年11月21日に装置の運転を停止した。二次処理水及び培養水中の水温、pH、溶存酸素、懸濁態物質(SS)、無機態窒素、PO₄³⁻、無機炭素及び溶存態鉄を定期的に測定した。また、培養藻類及び動物プランクトンの同定も行った。

2.2 数理モデルの構築

藻類増殖を表現する数理モデルの概念図を図-2に示す。数理モデルは、湖沼での藻類増殖を表現

するモデル⁷⁾を参考に構築した。既往のモデル⁷⁾では、藻類増殖に影響を及ぼす因子として、水温、日射量、無機態窒素及びPO₄³⁻を考慮している。一方、後述するとおり、二次処理水では、炭素(無機炭素)が藻類の増殖速度を支配する因子(律速因子)であるため、藻類の増殖における無機炭素の影響を新たに考慮した(式(4)の赤字部)。数理モデルにおける状態変数は、無機炭素(IC: mg-C/L)、無機態窒素(N: mg-N/L)、PO₄³⁻(P: mg-P/L)、藻類(M: mg-Chl a/L)、動物プランクトン(Z: mg/L)、デトリタス(D: mg/L)、溶存有機物(C: mg-C/L)及び溶存酸素(O: mg-O₂/L)である。デトリタスは、生物の死骸を意味する。藻類の増殖、呼吸・枯死は一次式で⁷⁾、また動物プランクトンによる捕食は温度影響及び藻類濃度による影響を考慮した⁸⁾(式(1)から式(4))。なお、式において、系内への各状態変数の流入は、添字“in”をつけた。培養装置内は完全混合であるとした。モデルで用いる諸係数については、本研究から得られた値、文献値を参照した。

$$\frac{dM}{dt} = \mu_{maxM} f_T f_I f_{CNP} M - k_d M - F_{maxZ} \frac{T}{20} \frac{K_{MZ}}{K_{MZ} + M} M Z \quad \text{式(1)}$$

$$f_T = -\frac{(T - T_{opt})^2}{T_{opt}^2} + 1 \quad \text{式(2)}$$

$$f_I = \frac{e}{(a + e_0(M + \frac{D}{Y_{MD}}))h} \left[\exp\left\{ -\frac{I}{I_{opt}} \exp\left(-\left(a + e_0\left(M + \frac{D}{Y_{MD}}\right)\right)h\right)\right\} \cdot \exp\left(-\frac{I}{I_{opt}}\right) \right] \quad \text{式(3)}$$

$$f_{CNP} = \frac{IC}{K_{ICM} + IC} \cdot \frac{N}{K_{NM} + N} \cdot \frac{P}{K_{PM} + P} \quad \text{式(4)}$$

ここで、 t : 時間 (d)、 μ_{maxM} : 藻類の最大比増殖速度(d⁻¹)、 f_T : 水温による影響項(-)、 f_I : 日射量による影響項(-)、 f_{CNP} : 無機炭素、無機態窒素及びPO₄³⁻による影響項(-)、 k_{dM} : 藻類の呼吸・枯死速度(d⁻¹)、 F_{maxZ} : 動物プランクトンの最大ろ過速度(L/mg/day)、 K_{MZ} : 動物プランクトンのろ過の半飽和定数 (mg-Chl a/L)、 T : 水温(°C)、 T_{opt} : 最適水温(°C)、 α : 水の吸光係数(m⁻¹)、 ϵ_0 : SSの吸光係数(L/mg/m)、 γ_{MD} : 藻類のSSへの換算係数(mg/mg-Chl a)、 Q : 流量 (m³/d)、 H : 培養槽水深(m)、 V : 培養槽体積(m³)、 I : 全天日射量(MJ/m²/d)、 I_{opt} : 最適全天日射量(MJ/m²/d)、 K_{ICM} : 無機炭素の半飽和定数(mg-C/L)、 K_{NM} : 無機態窒素の半飽和定数(mg-N/L)、 K_{PM} : PO₄³⁻の半飽和定数(mg-P/L)。

3. 結果及び考察

3.1 藻類培養条件

培養を実施した地点における実験期間での月別平均気温及び全天日射量はそれぞれ12.2~26.0°C及び7.9~18.7MJ/m²/dの範囲にあった。

二次処理水での炭素(無機炭素):窒素(無機態窒素):リン(PO₄³⁻):鉄(溶存鉄)のモル比は、17:17:1:2×10⁻²であり、藻類がこれらの元素を取り込む比率を示すレッドフィールド比(106:16:1:10⁻³-10⁻⁴)と比べて、炭素の割合が低いことが明らかとなった。このことから、二次処理水のみでは濃度が低い無機炭素が藻類増殖速度を支配し、培養藻類量が少なくなるため、培養槽への炭素源としてのCO₂添加が有効であると考えられた。

3.2 藻類培養効果

培養藻類によるバイオマス濃度の指標となるSSについて、図-3(a)に二次処理水及び培養水での実測値の経時変化(n=45)を示す。二次処理水中SSは中央値4.2mg/Lであった。培養水では、6月25日から6月27日にかけて、SSが137から30mg/Lまで減少した。7月1日の動物プランクトン数(879 inds./mL)が他のサンプリング日(中央値:35 inds./mL)に比べて1オーダー高く、動物プランクトンの増殖が藻類を含むSSの減少に寄与した可能性が考えられる。7月にSSが増加した後、8月、9月で、SSが206 mg/L及び166 mg/Lと比較的安定した値を示した。その後、10月28日

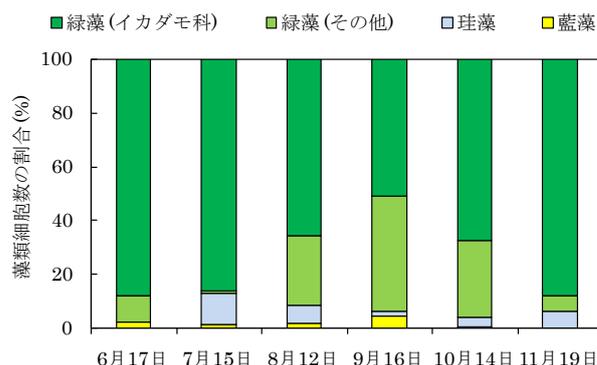


図-4 各月での藻類構成⁹⁾

から11月21日にかけて164から90mg/Lまで減少した。急激な水温低下(17.4°Cから10.2°C)による寄与が考えられる。また、SSに占める動物プランクトンは高々3.2%であり、SSは主として藻類および藻類由来のデトリタスで占めていた。

3.3 藻類の同定

培養槽での藻類同定結果(n=22)の一例を図-4に示す。培養期間を通じて、全藻類細胞数に占める緑藻の細胞数の割合が85~97%と高く、特にイカダモ科が51~87%と優占することが明らかとなった。イカダモ科のオイル含有量は20%程度と高いことが報告されており¹⁰⁾、特定の藻類の添加を行わず、エネルギー価の高いイカダモの培養が期待できることが示された。緑藻が優占化し続けた原因として、緑藻及び珪藻の増殖における最適水温及び全天日射量はそれぞれ25°C及び13.9MJ/m²/d、ならびに17°C及び11.5MJ/m²/dであり⁷⁾、培養した気候が緑藻に適した環境であったことが考えられる。また、実環境における突発的な藍藻の優占化は、溶存鉄が枯渇した条件下で、藍藻が鉄と結合するキレート(シデロフォア)を放出し、藍藻が特異的に鉄を取り込み増殖するためと報告されている¹¹⁾。上記のとおり、レッドフィールド比との比較から、二次処理水で鉄が豊富に存在していることが分かり、藍藻が優占しにくい環境であったと考えられる。これらのことから、緑藻類が優占し続けたものと判断される。

3.4 数理モデルの検証

以上の結果を踏まえ、モデルより、SS(藻類+動物プランクトン+デトリタス)を算出した。計算値を図-3(a)に、また実測値及び計算値の相関を図-3(b)に示す。数値計算は、SSの増加が始まった7月4日から行った。また、培養期間を通じて

緑藻が優占したことから、構築したモデルで藻類間の競合を考慮しなかった。モデルによるSS計算値は、7月の増加、8、9月での安定、ならびに11月での減少といった経時変化を再現できた。

3.5 考察

以上のことから、構築したモデルは下水処理水を用いた培養藻類濃度予測を可能とした。今後は、藻類が含むエネルギー量も表現可能な数理モデルへと改良させることで、下水処理場での藻類培養によるエネルギー収支評価に資するツールへと発展させることを予定している。

4. おわりに

本研究では、下水処理場での下水処理水を用いた培養藻類量を予測するための数理モデルを構築し、藻類培養実験結果を踏まえ、数理モデルの再現性を評価した。培養実験より、特定の藻類の添加を行わず、エネルギー価の高いイカダモの培養が期待できることが示された。また、構築した数理モデルは、培養藻類濃度予測を可能とし、下水処理場への藻類培養システム導入検討の支援ツールとしての利用が期待される。

参考文献

- 1) 国土交通省、下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン改訂版一、pp.1~2、2014
- 2) Chisti, Y.: Biodiesel from microalgae, *Biotechnology Advances*, Vol.25, No.3, pp.294-306, 2007
- 3) Sydney, E.B., da Silva, T.E., Tokarski, A., Novak, A.C., de Carvalho, J.C., Woiciechowski, A.L., Larroche, C., Soccol, C.R.: Screening of microalgae with potential for biodiesel production and nutrient removal from treated domestic sewage, *Applied Energy*, Vol.88, No.10, pp.3291-3294, 2011
- 4) Inoue, K., Uchida, T.: Microalgae cultured by sewage and organic constituents, *Chemosphere*, Vol.93, No.7, pp.1442-1445, 2013
- 5) 田中剛：海洋微細藻類の高層化培養によるバイオディーゼル生産、科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業「二酸化炭素排出抑制に資する革新的技術の創出」H25年度実績報告、2014

- 6) Park, J.B.K., Craggs, R.J.: Algal production in wastewater treatment high rate algal ponds with carbon dioxide addition, *Water Science and Technology*, Vol.63, No.10, pp.2403-2410, 2011
- 7) Tsuno, H., Hidaka, T., Jorgensen, S.E.: 2-Layer Model Development, Planning and Management of Lakes and Re-servoirs, *Models for Eutrophication Management, PAMOLARE Training Package Version 1.0*, UNEP International Environmental Technology Centre (UNEP-DTIE-IETC) and International Lake Environment Committee (ILEC), pp.50-73, 2001
- 8) Di Toro, D.M., O'Connor, D.J., Thomann, R.V.: A dynamic model of the phytoplankton population in the Sacramento San Joaquin Delta, *Advanced Chemistry Ser.*, Vol.106, pp.131-180, 1971
- 9) 高部祐剛、日高平、津森ジュン、南山瑞彦：下水処理水を直接利用した微細藻類培養特性のモデル化に関する研究、環境工学研究フォーラム講演集、印刷中
- 10) de Alva, M.S., Luna-Pabello, V.M., Cadena, E., Ortiz, E.: Green microalga *Scenedesmus acutus* grown on municipal wastewater to couple nutrient removal with lipid accumulation for biodiesel production, *Bioresource Technology*, Vol.146, pp.744-748, 2013
- 11) Murphy, T.P., Lean, D.R.S., Nalewajko, C.: Blue green algae: their excretion of iron selective chelators enables them to dominate other algae, *Science*, Vol.192, pp.900-902, 1975

高部祐剛



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 研究員
Yugo TAKABE

南山瑞彦



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 上席研究員
Mizuhiko MINAMIYAMA