

6.2 下水道を核とした資源回収・生産・利用技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：材料資源研究グループ

研究担当者：津森ジュン、日高平、高部祐剛

【要旨】

有機物・栄養塩が集約される下水処理場の資源、施設を活用した資源回収・生産・利用技術に関する調査・研究を行った。効率的なリン回収方法の開発を目的に、白金コーティングチタン電極を用いた下水脱水分離液の電気分解実験を行い、時間経過とともに電気分解によるリン回収量が低下するため、電極での回収量の維持・回復がリン回収率向上において重要であると考えられた。また、下水処理水を直接利用した上で培養される微細藻類を活用したエネルギー生産システムの構築を目的に、自然条件下での Raceway 型藻類培養装置を用いた培養実験を行い、CO₂ 添加により培養藻類中の高位発熱量が向上することを明らかにするとともに、藻類増殖を表現する数理モデルを構築し、実験データを用いて、数理モデルの再現性を確認した。

キーワード：電気分解、リン、微細藻類培養、CO₂ 添加、数理モデル

1. はじめに

我が国は、エネルギー自給率、食料自給率ともに低く、再生可能エネルギーや資源リサイクル等の活用、普及拡大が促される現代において、下水道が有する水・資源・エネルギーのポテンシャルを活用した、農業、エネルギー産業等への貢献が期待されている¹⁾。

ヒトの社会活動に必要な不可欠な資源であるリンについて、日本ではリン鉱石を全量海外から輸入し、その約 80%を肥料として利用している。しかし、諸外国ではリンを輸出規制する動きがあり、輸入以外での安定的なリン資源の確保が課題となる。一方、下水道はリン資源を大量に保有している²⁾ことから、下水からのリン回収を積極的に行い、回収したリンを農業用肥料として使い、環境に返し、循環させることで、日本での安定したリン資源確保に貢献することが期待される。当チームでは、電気分解による下水からのリン資源の回収手法について検討を行ってきたが電気分解によるリン回収効率の向上が課題となっている³⁾。また、近年、藻類を用いたエネルギー生産に大きな注目が集まっている⁴⁾。下水中には栄養塩が多く含まれることから下水を利用した藻類培養、エネルギー生産が期待される。当チームでは、下水処理水を直接利用し培養される藻類を利用したエネルギー生産システムの構築を目的に研究を展開しているが⁵⁾、自然条件の変化を考慮した藻類培養技術の確立には至っていない。

これらの観点から電気分解による下水からのリン資

源の回収を目的とした「高濃度栄養塩含有物質からの資源回収・利用技術の開発」では、リン回収率向上のための課題の抽出を行った。また、「藻類による資源生産システムの開発」では、自然条件下での Raceway 型藻類培養装置を用いた培養実験を行い、CO₂ 添加が培養藻類中の高位発熱量に及ぼす影響の把握、ならびに藻類増殖を表現する数理モデルを構築し、実験データを用いて、数理モデルの再現性を評価することとした。

2. 高濃度栄養塩含有物質からの資源回収・利用技術の開発

下水道には、リン肥料輸入量の最大約 30%のリンが流入しているとの試算がある等⁷⁾、リンが豊富に存在することが広く知られており、下水道からのリン回収によるリン資源確保への貢献が期待されている。一方で、リン回収におけるコスト、安定的な取引先の確立といった課題が存在し⁸⁾、広く普及に至っていないのが現状である。

当チームにおいて、電気分解を用いたリンの回収手法の検討を行ってきた。アルカリ剤添加が必要な HAp 法等の従来のリン回収手法に比べ、電気分解により陰極近傍をアルカリ条件下にしてリンを析出させるためアルカリ剤添加が不要であり、より低コストなリン回収の達成が期待される。また、電極に鉄を適用した場合、析出物としてリン酸鉄が得られる一方で、白金コーティングチタン電極を用いることで、リンがヒドロキ

シアパタイトの形で析出することが明らかとなっている³⁾。一方で、リン回収率向上が課題となっている³⁾。

本年度は、脱水分離液を対象とし、電気分解実験を行い、脱水分離液中のリン濃度の経時変化を把握した上で、リン回収率向上のための課題の抽出を行った。

2.1 方法

電気分解の容器には 5 L ビーカーを用い、白金コーティングチタン電極板 4 枚を陽極と陰極を交互に配列し、電源には直流安定化電源 (菊水電子工学(株)、PCM 18-5A)を使用した (図 2-1)。対象試料は、実処理場より採取後ろ過 (GF/B, Whatman)を行った脱水分離液である。電流を 3.5 A に設定し、電流一定で 96 時間通電した。容器内の脱水分離液は、通電開始後 6、30、54 および 78 時間後の計 4 回、一定量 (2 L)を入れ替えた。容器内の脱水分離液について、1、3、6、24、30、48、54、72、78、96 時間後に、水温、pH、DO、窒素およびリン濃度の測定を行った。実験終了時の陰極の析出物 (40℃で半日乾燥)を対象に、リン、ナトリウム、カリウム、鉄、カルシウムおよびマグネシウム濃度を測定した。

窒素およびリン濃度は TRAACS2000 (Bran Luebbe) で測定し、ナトリウム、カリウム、鉄、カルシウムおよびマグネシウム濃度については、高周波誘導結合プラズマ発光分光分析装置 (PerkinElmer、Optima 8000) により測定した。

2.2 結果と考察

表 2-1 に本実験で用いた脱水分離液の組成を示す。DTN に占める NH_4^+ の割合は 75.4%、DTP に占める PO_4^{3-} の割合は 62.8%であった。

図 2-2 に電気分解を実施した系 (電気分解系)における水温、pH、DO、窒素およびリン濃度の経時変化を示す。リンについては、水入れ換え後の脱水分離液におけるリン濃度の理論値も合わせて示す。

水温について、電子移動における水の抵抗による発熱が原因となり、実験開始後 3 時間で、32℃まで上昇し、その後も 35℃付近で維持された。

pH は、サンプリング時間において多少のばらつきがあるが、6 付近の値であった。

DO は、陽極での反応 (式 2-1)により酸素が発生するため、実験期間中 22 mg- O_2 /L 以上であった。

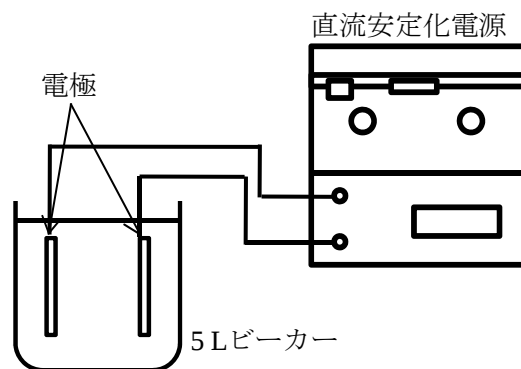
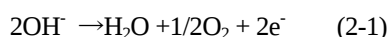


図 2-1 電気分解実験系

表 2-1 脱水分離液の組成

TOC (mg-C/L)	DOC (mg-C/L)	IC (mg-C/L)	SS (mg/L)
484	450	30.5	280
TN (mg-N/L)	DTN (mg-N/L)	NH_4^+ (mg-N/L)	
99	85.8	64.7	
TP (mg-P/L)	DTP (mg-P/L)	PO_4^{3-} (mg-P/L)	
26.5	16.4	10.3	

窒素濃度については、82.9±3.94 mg-N/L であり、実験期間を通じて、濃度に顕著な変化は見られなかった。

リン濃度については、実験前は 16.4 mg-P/L であったが、実験開始後 1 時間で 3.92 mg-P/L と、12.5 mg-P/L の濃度減少が確認された。その後、一定時間ごとの系内の水入れ換にとともに系内のリン濃度が上昇したと考えられるが、水入れ換え後の 18 時間の電気分解による濃度減少は、最大でも 5 mg-P/L であった。

次に、脱水分離液における 0-30、30-54、54-78、78-96 時間でのリンの減少量を図 2-3 に示す。0-30 時間で 68 mg-P のリンの減少があったが、その後は、高々 26 mg-P (30-54 時間)の減少であった。このことから、本実験での電気分解による脱水分離液からのリン回収は主として、実験開始後 30 時間以内に生じていることが明らかとなり、また、時間経過とともに減少量が減少する傾向が見られた。時間経過とともに、脱水分離液中のリンの減少量が低減した一因としては、析出物形成の核となる陰極⁹⁾周りに析出物が付着することで不導体が形成され、リン析出の効率が低下した可能性があり、リン回収率向上においては、この不導体の対策が重要であると考えられる。

電気分解系での陰極への析出物の組成を図 2-4 に示す。析出物でのリン濃度は 12 g-P/kg-DS であった。また、他の元素に比べ、マグネシウム濃度が 210 g-Mg/kg-DS と高濃度で検出された。

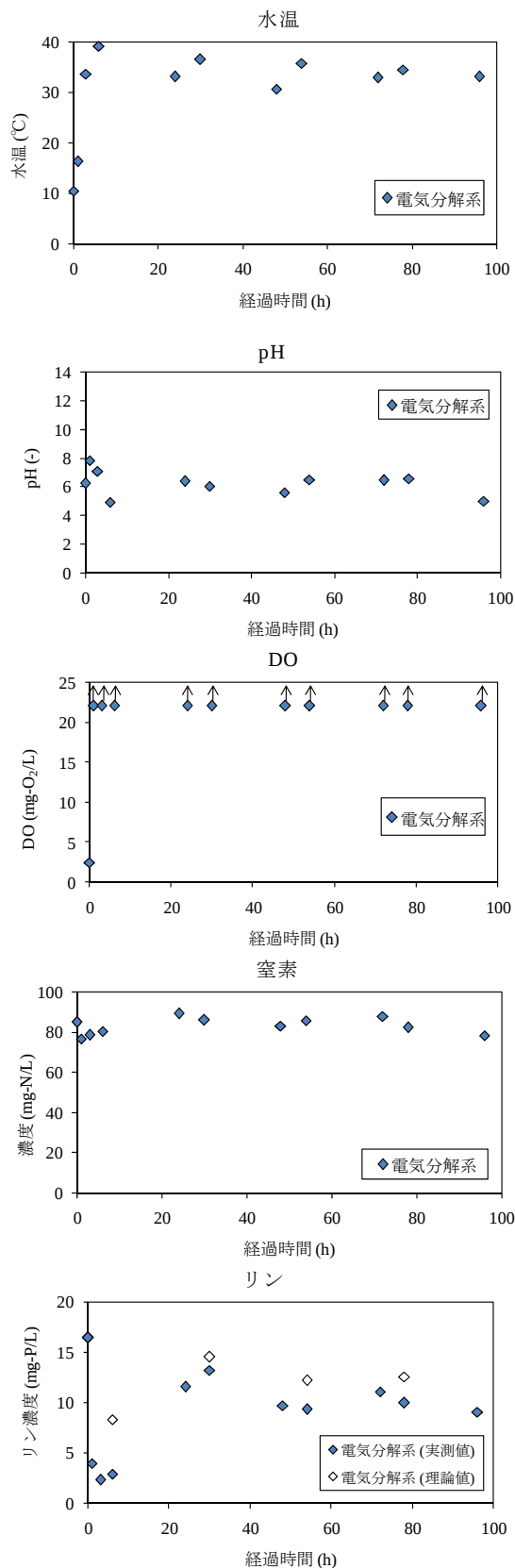


図 2-2 電気分解系およびブランク系での各水質項目の経時変化。DO データでの矢印は、プロット点以上の値を示す

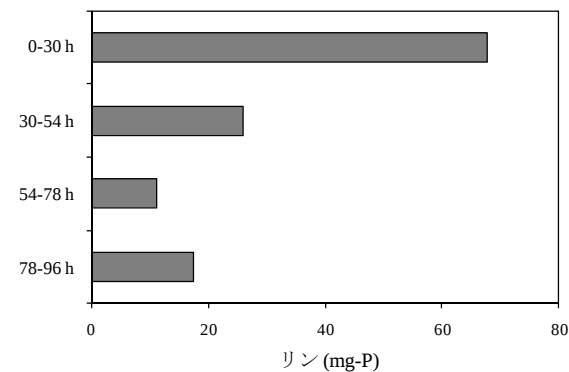


図 2-3 電気分解による脱水分離液中リン減少量

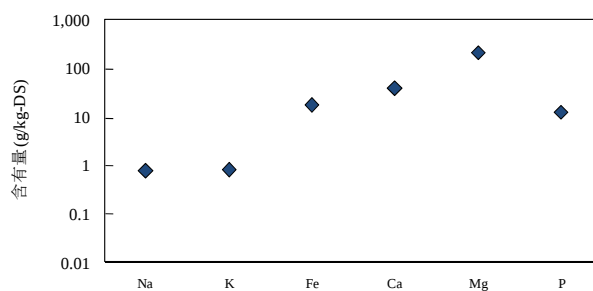


図 2-4 析出物中の元素含有量

3. 藻類による資源生産システムの開発

化石燃料の枯渇への懸念、化石燃料利用にともなう地球温暖化を背景に、再生可能エネルギーの利用が推進される現代において、藻類を用いたエネルギー生産に大きな注目が集まっている。近年では、都市下水や工場排水に豊富に含まれる窒素、りんといった栄養塩を用いた藻類培養の試みが実施されてきている^{10), 11)}。日本のように下水道システムが広く普及している国々では、処理プロセスを経た処理水に含まれる栄養塩や、焼却炉や消化ガス由来 CO₂ といった下水処理場が有する資源および下水処理場でのストック (土地、施設) を活用した藻類培養によるエネルギー生成が期待される。

既往研究において^{12), 13)}、ボトリオコッカスやクロレラといったオイル含量の高い特定藻類を対象に、下水処理水を用いた培養がラボレベルで実施されているが、これら特定の藻類の培養は、実環境下での適用性に課題が残る。当チームにおいては^{5), 6)}、植種を行わず、二次処理水を直接利用した藻類培養実験を行い、藍藻類や緑藻類が優占すること、また、CO₂ 添加および水理学的滞留時間 (HRT) が藻類培養特性に及ぼす影響をラボレベルで明らかにしている。一方で、自然条件下での藻類培養におけるこれら操作因子の効果については実証されていない。また、実施設計の方法、操

作方法を提示するためには、まず、光、水温、降雨といった自然環境の変化、処理水質の変動等が藻類培養に及ぼす影響を明らかにするとともに、設計・操作因子を明らかにする必要がある。既往研究¹⁴⁾では、下水処理水を用いた藻類培養のモデルを構築しているが、自然環境の変化が藻類培養増殖特性に与える影響は考慮されていない。そこで、本研究では、下水処理水を用い、CO₂を添加した条件下での藻類培養を、屋外に設置した培養装置で実施し、自然条件下での藻類増殖特性およびCO₂添加効果を既往研究³⁾との比較を含め把握するとともに、自然環境の変化も考慮に入れた藻類増殖を表現する数理モデルを構築し、実測データを用いてその再現性を確認することを目的とした。

3.1 方法

藻類培養に用いた下水二次処理水は、実流入下水を標準活性汚泥法処理装置(容積: 100 L、HRT: 6時間)で連続的に処理して得た。実下水処理場の屋外に設置したRaceway型培養装置(図3-1)に流速95 L/日で連続的に二次処理水を流入させ、HRT4日で藻類培養を行った。過去の知見¹⁰⁾に従って、培養槽中pHが8に達した時にガスボンベよりCO₂を添加し、藻類増殖に必要な炭素源を供給した。装置へのCO₂添加を2014年6月6日より開始し、11月21日に装置の運転を停止した。

流入下水、処理水および培養水中の水温、pHおよびDOを平日1回、また、栄養塩(窒素、りん)、クロロフィルa、SS、有機・無機炭素濃度を原則週に2回測定した。また、藻類および動物プランクトンの同定を原則2週間に1度実施した。さらに、培養藻類の高位発熱量を測定した(n=10)。本原稿では、SS、栄養塩、溶存有機物濃度ならびに藻類および動物プランクトン同定結果を中心に報告する。

pHおよび水温は、HM-31P(TOA DKK, Japan)で、DOはDO-31P(TOA DKK, Japan)でそれぞれ測定した。窒素およびりん濃度は、TRAACS2000(Bran Luebbe, Germany)で、また、有機・無機炭素濃度は、TOC-V CPH(Shimadzu, Japan)でそれぞれ測定した。SS、クロロフィルaおよび高位発熱量はStandard method¹⁵⁾、河川水質試験方法(案)¹⁶⁾およびJIS M 8814¹⁷⁾に従い測定した。藻類および動物プランクトンの同定は、光学顕微鏡(BH-2, Olympus, Japan)を用いて行った。

3.2 結果および考察

実験期間での培養を実施した地点における月別平均

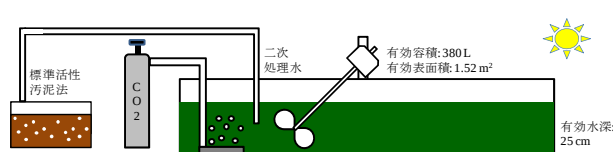


図3-1 藻類培養装置の概略図

気温は12.2-26.0℃の範囲にあり8月で最も高く、また、全日日射量は7.9-18.7 MJ/m²/dayの範囲であり7月で最も高かった¹⁸⁾。

実験期間を通じた、流入下水でのSS、全有機炭素、全窒素および全リンの中央値は、それぞれ97.0 mg/L、26.4 mg-C/L、25.6 mg-N/L および3.40 mg-P/Lであったのに対して、二次処理水では、4.2 mg/L(除去率中央値: 95.0%)、7.20 mg-C/L(75.5%)、15.6 mg-N/L(39.7%)および2.00 mg-P/L(43.3%)であった。

藻類培養槽でのDOは、光合成により10 mg-O₂/L以上と飽和・過飽和状態であり、pHはCO₂添加にともない7.7-8.0の間で安定していた。

無機炭素濃度は、二次処理水で11.8 mg-C/Lであったが、CO₂添加により培養槽では21.4 mg-C/Lと増加した。

図3-2に二次処理水および培養水でのSS、無機態窒素、PO₄³⁻および溶存有機物濃度の経時変化を示す。6月25日から6月27日にかけて、SSが137から30 mg/Lまで大きく減少し、無機態窒素およびPO₄³⁻が0.225から1.55 mg-N/Lおよび0.161から0.527 mg-P/Lまで上昇した。7月1日の動物プランクトン数が他のサンプリング日に比べて1オーダー高く、この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が中央値で206および166 mg/Lと比較的安定した値を示した。無機態窒素およびPO₄³⁻はそれぞれの月で2.56 mg-N/Lおよび1.39 mg-P/L、ならびに1.72 mg-N/Lおよび0.521 mg-P/Lであり、二次処理水に比して81.5および44.4%、ならびに87.8および65.4%の除去率が得られた。

10月5、6日の台風での激しい降雨(降雨量合計: 199 mm)により10月3日から7日にかけて、SSが136 mg/Lから116 mg/Lまで減少したが、1週間後の10月14日には146 mg/Lまで回復した。その後、10月28日から11月21日にかけてSSが164から90 mg/Lまで減少し、無機態窒素およびPO₄³⁻も6.53から11.0 mg-N/Lおよび0.062から1.16 mg-P/Lまで上昇した。このSSが減少した期間において、水温が17.4℃から10.2℃に急激に低下しており、この水温低下がSS減少の一因である

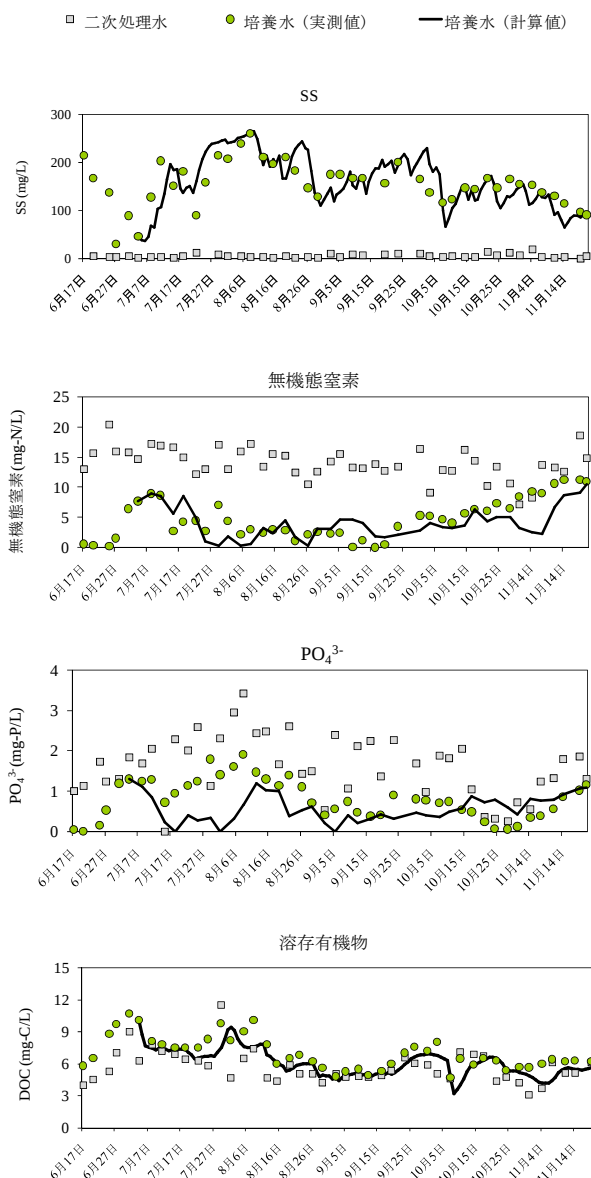


図 3-2 二次処理水および培養水での SS、無機態窒素、PO₄³⁻および溶存有機物濃度の実測値および数値モデルによる計算値

と考えられる。

培養槽で確認された動物プランクトンについて、体積から換算した乾燥重量¹⁹⁾は、培養槽での SS の高々 3.2%であり、SS は藻類および藻類由来のデトリタスで構成されていると考えられる。

SS 濃度が比較的安定した 8 月での培養槽単位面積当たりの SS 培養量は 12.9 g/m²/day であった。ニュージーランドでの流入下水を用いた HRAP (High Rate Algal Pond)において、夏季 (11 月-1 月)で 15.3 g/m²/day の培養量が得られており¹⁰⁾、本研究での 8 月の培養量は、この HRAP での 85%の値であった。藻類培養槽での溶

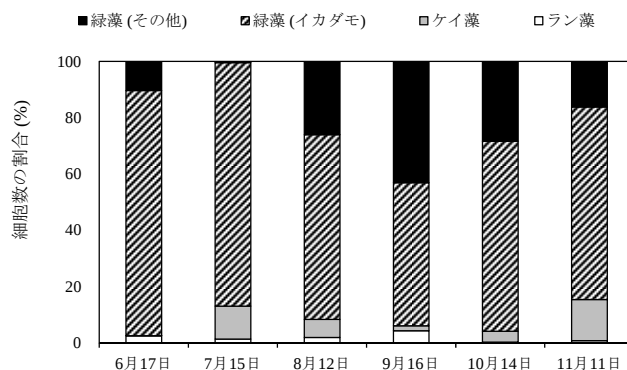


図 3-3 実験期間での培養藻類の構成

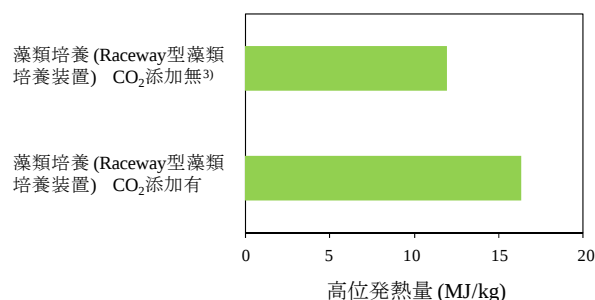


図 3-4 培養藻類の高位発熱量

存有機物濃度については、2 次処理水中の変動に呼応する形で変化した一方で、培養期間での 2 次処理水中濃度 (中央値: 5.30 mg-C/L)に比して、培養槽 (6.40 mg-C/L)での濃度は高かった。藻類の炭素固定にともない SS が増殖し、藻類由来のデトリタスの一部が分解することで溶存有機物濃度が上昇したものと考えられる。

培養槽での藻類同定結果の一例を図 3-3 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%と優占した。

図 3-4 に本研究および既往研究³⁾での培養藻類中高位発熱量を示す。本研究での高位発熱量は、SS が減少した 7 月 1 日で 13.5 MJ/kg と特異的に低かったが、その他の期間では、15.3 から 18.0 MJ/kg の範囲で安定した値を示した。また、既往研究³⁾での値に比して、高位発熱量が 36.7%増加したことから、自然条件下での藻類培養における CO₂ 添加効果が示された。

藻類増殖を表現する数値モデルの概念図を図 3-5 に示す。数値モデルは、Tsuno et al.²⁰⁾の湖沼モデルを参考に構築し、さらに本研究では藻類の増殖における無機炭素の影響を考慮した。状態変数は、藻類 (M : mg-Chl a/L)、動物プランクトン (Z : mg/L)、デトリタス (D :

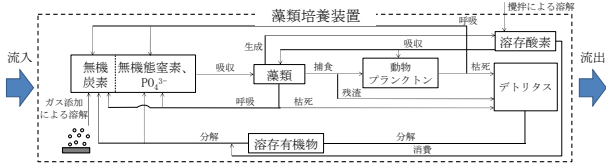


図 3-5 数理モデルの概念図

mg/L)、溶存有機物 (C : mg-C/L)、無機炭素 (IC : mg-C/L)、無機態窒素 (N : mg-N/L)、 PO_4^{3-} (P : mg-P/L)およびDO (O : mg- O_2 /L)である。なお、以下に示す数式において、系内への各状態変数の流入は、右下に“in”と表記する。

藻類の増殖での影響項は無機炭素、無機態窒素および PO_4^{3-} 濃度、水温ならびに全天日射量を考慮し、影響項の式は既往研究を参照とした^(20, 21)。藻類の増殖、呼吸・枯死は一次式で、また動物プランクトンによる捕食は温度影響および藻類濃度による影響を考慮した⁽²⁰⁾。

各状態変数の物質収支式に関する式(3-1)から(3-11)に示す。なお、培養槽での無機炭素の変化は、実測値を直線的に変化するものとし、培養槽内は完全混合であるとした。また、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、または文献値⁽²⁰⁻²⁸⁾を参照した。

藻類

$$\frac{dM}{dt} = \frac{Q}{V} M_{in} + \mu_{max} f_T f_I f_{CNP} \cdot M - k_{dM} \cdot M - F_{maxZ} \cdot \frac{T}{20} \cdot \frac{K_{MZ}}{K_{MZ} + M} \cdot M \cdot Z - \frac{Q}{V} M \quad (3-1)$$

$$f_T = -\frac{(T - T_{opt})^2}{T_{opt}^2} + 1 \quad (3-2)$$

$$f_I = \frac{e}{(\alpha + \epsilon_0(\gamma_{MD} \cdot M + Z + D)) \cdot H} \left[\exp \left\{ -\frac{I}{T_{opt}} \cdot \exp \left(-(\alpha + \epsilon_0(\gamma_{MD} \cdot M + Z + D)) \cdot H \right) \right\} - \exp \left(-\frac{I}{T_{opt}} \right) \right] \quad (3-3)$$

$$f_{CNP} = \frac{IC}{K_{ICM} + IC} \cdot \frac{N}{K_{NM} + N} \cdot \frac{P}{K_{PM} + P} \quad (3-4)$$

動物プランクトン

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{Q}{V} Z_{in} + \gamma_{MZ} \cdot Y_{MZ} \cdot F_{maxZ} \cdot \frac{T}{20} \cdot \frac{K_{MZ}}{K_{MZ} + M} \cdot M \cdot Z - k_{dZ} \cdot Z - \frac{Q}{V} Z \quad (3-5)$$

デトリタス

$$\frac{dD}{dt} = \frac{Q}{V} D_{in} + \gamma_{MD} \cdot Y_{MD} \cdot k_{dM} \cdot M + \gamma_{MD} \cdot (1 - Y_{MD}) \cdot F_{maxZ} \cdot \frac{T}{20} \cdot \frac{K_{MZ}}{K_{MZ} + M} \cdot M \cdot Z + Y_{ZD} \cdot k_{dZ} \cdot Z - k_{dD} \cdot D - \frac{Q}{V} D \quad (3-6)$$

溶存有機物

$$\frac{dC}{dt} = \frac{Q}{V} C_{in} + \gamma_{DC} \cdot k_{dD} \cdot D - k_{dC} \cdot C - \frac{Q}{V} C \quad (3-7)$$

無機態窒素

$$\frac{dN}{dt} = \frac{Q}{V} N_{in} + \gamma_{CN} \cdot k_{dC} \cdot C + \gamma_{MN} \cdot (1 - Y_{MD}) \cdot k_{dM} \cdot M + \gamma_{ZN} \cdot (1 - Y_{ZD}) \cdot k_{dZ} \cdot Z - \gamma_{MN} \mu_{max} f_T f_I f_{CNP} \cdot M - \frac{Q}{V} N \quad (3-8)$$

PO_4^{3-}

$$\frac{dP}{dt} = \frac{Q}{V} P_{in} + \gamma_{CP} \cdot k_{dC} \cdot C + \gamma_{MP} \cdot (1 - Y_{MD}) \cdot k_{dM} \cdot M + \gamma_{ZP} \cdot (1 - Y_{ZD}) \cdot k_{dZ} \cdot Z - \gamma_{MP} \mu_{max} f_T f_I f_{CNP} \cdot M - \frac{Q}{V} P \quad (3-9)$$

DO

$$\frac{dO}{dt} = \frac{Q}{V} O_{in} + k_L \frac{A(O_{sat} - O)}{V} + \gamma_{MO} \mu_{max} f_T f_I f_{CNP} \cdot M - \gamma_{MO} \cdot (1 - Y_{MD}) \cdot k_{dM} \cdot M - \gamma_{ZO} \cdot (1 - Y_{ZD}) \cdot k_{dZ} \cdot Z - \gamma_{CO} \cdot k_{dC} \cdot C - \frac{Q}{V} O \quad (3-10)$$

$$O_{sat} = 16.5 - \frac{8.0}{22.0} T \quad (3-11)$$

ここで、 Q : 系内への流入・流出水量 (m^3 /day)、 V : 系内の水量 (m^3)、 A : 系内の水表面積 (m^2)、 H : 系内の水位 (m)、 T : 水温 ($^{\circ}C$)、 I : 全天日射量 (MJ/m^2 /day)、 O_{sat} : 飽和溶存酸素濃度 (mg- O_2 /L)、 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、無機態窒素および PO_4^{3-} 濃度による影響項 (-)、 μ_{max} : 藻類の最大比増殖速度 (day^{-1})、 T_{opt} : 藻類の最適水温 ($^{\circ}C$)、 I_{opt} : 藻類の最適全天日射量 (MJ/m^2 /day)、 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} : PO_4^{3-} の半飽和定数 (mg-P/L)、 k_{dM} : 藻類の呼吸・枯死速度 (day^{-1})、 α : 水の吸光係数 (m^{-1})、 ϵ_0 : SSの吸光係数 (L/mg/m)、 F_{maxZ} : 動物プランクトンの最大過速度 (L/mg/day)、 K_{MZ} : 動物プランクトンの過の半飽和定数 (mg-Chl a/L)、 k_{dZ} : 動物プランクトンの呼吸・枯死速度 (day^{-1})、 k_{dD} : デトリタスの分解速度 (day^{-1})、 k_{dC} : 溶存有機物の分解速度 (day^{-1})、 k_L : 酸素ガス移動係数 (m/day)、 Y_{MD} : 藻類の呼吸・枯死における枯死の割合 (-)、 Y_{ZD} : 動物プランクトンの呼吸・枯死における枯死の割合 (-)、 Y_{MZ} : 動物プランクトンによる藻類の捕食の割合 (-)、 γ_{MD} : 藻類からデトリタスへの換算係数 (mg/mg-Chl a)、 γ_{MZ} : 藻類から動物プランクトンへの換算係数 (mg/mg-Chl a)、 γ_{DC} : デトリタスから溶存有機物への換算係数 (mg-C/mg)、 γ_{MO} : 藻類の光合成・呼吸における酸素発生・消費量 (mg- O_2 /mg-Chl a)、 γ_{ZO} : 動物プランクトンの呼吸における酸素消費量 (mg- O_2 /mg)、 γ_{CO} : 溶存有機物分解時の酸素消費量 (mg- O_2 /mg-C)、 γ_{MN} : 藻類の窒素含有量 (mg-N/mg-Chl a)、 γ_{ZN} : 動物プランクトンの窒素含有量 (mg-N/mg)、 γ_{CN} : 溶存有機物の窒素含有量 (mg-N/mg-C)、 γ_{MP} : 藻類のリン含有量 (mg-P/mg-Chl a)、 γ_{ZP} : 動物プランクトンのリン含有量 (mg-P/mg)、 γ_{CP} : 溶存有機物のリン含有量 (mg-P/mg-C)

構築したモデルによるSS (藻類+動物プランクトン+デトリタス)、無機態窒素、 PO_4^{3-} および溶存有機物濃度

の計算値を図3-2に示す。なお、数値計算は、SSの増加が始まった7月4日から行った。

図3-2より、各項目ともに、培養槽での増減の傾向を良く再現できていることが理解できる。また、SSが比較的安定した8、9月での実測値および計算値の中央値は、SS、無機態窒素、 PO_4^{3-} および溶存有機物濃度でそれぞれ、178および195 mg/L、2.40および2.37 mg-N/L、0.900および0.463 mg-P/Lならびに6.35および5.78 mg-C/Lであり、 PO_4^{3-} の計算値が実測値よりやや小さかったが、モデルでの計算値は実測値と同様の値となり、本モデルによる実測データの再現性が示された。

4. まとめ

本研究では、電気分解を用いた脱水分離液からのリン回収における回収率向上のための課題の抽出を行った。また、自然条件下での Raceway 型藻類培養装置を用いた培養実験を行い、 CO_2 添加による培養藻類中の高位発熱量への影響の把握、ならびに藻類増殖を表現する数理モデルを構築した。以下に得られた成果を示す。

- 1) 下水脱水分離液の白金コーティングチタン電極を用いた電気分解実験において、リン回収は主として、実験開始後 30 時間以内に生じていることが明らかとなった。また、時間経過とともに脱水分離液中リンの減少量が減少する傾向が見られ、この原因として、陰極周辺での不導体の形成が寄与している可能性があり、このことから、電極での回収量の維持・回復がリン回収率向上において重要であると考えられる。
- 2) 自然環境かつ CO_2 添加条件下での藻類培養により、培養藻類中の高位発熱量は、概ね 15.3 から 18.0 MJ/kg の範囲で安定した値を示した。また、既往研究との比較から、 CO_2 添加により高位発熱量が 36.7%増加したことが分かり、自然条件下での藻類培養における CO_2 添加効果が示された。
- 3) 自然環境変化を考慮にいた、藻類増殖を表現する数理モデルを構築し、実験データを用いて、モデルによるデータの再現性を示した。

今後は、電極でのリン回収量の維持・回復手法を検討するとともに、藻類培養においては、地域が異なる下水処理場での処理水を用いた藻類培養実験を実施、本モデルの適用性について検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 国土交通省: 新下水道ビジョン、3. 下水道長期ビジョン～「循環のみち下水道」の成熟化～ p.3.17、2014。

- 2) 加藤文隆、大下和徹、高岡昌輝、武田信生、松本忠生、檜物良一: 下水処理システムからの各種リン回収技術の仮想的適用および評価、土木学会論文集 G、Vol. 62 (1)、pp.27-40、2006。
- 3) 津森ジュン、井上研一郎、日高平、桜井健介: 下水道を核とした資源回収・生産・利用技術に関する研究、平成 25 年度下水道関係調査研究年次報告書集、土木研究所資料 4294 号、pp.12-21、2013。
- 4) Y. Chisti: Biodiesel from microalgae, *Biotechnology Advances*, 25, 294-306, 2007。
- 5) K. Inoue, T. Uchida: Microalgae cultured by sewage and organic constituents, *Chemosphere*, Vol.93 (7), pp.1442-1445, 2013。
- 6) K. Inoue, T. Uchida: Microalgae cultured by sewage and organic constituents, *Chemical Engineering and Technology*, Vol.36 (12), pp.2169-2173, 2013。
- 7) 加藤文隆、大下和徹、高岡昌輝、武田信生: 下水処理システムからのリン回収技術の評価に関する一考察、環境衛生工学研究、Vol. 17 (3)、pp.70-75、2003。
- 8) 佐藤隼、佐藤俊秀、仲川祐司、林志洋、松本頌、城山英明、松尾真紀子、鎗目雅: 国内下水道からのリサイクル・リン普及の課題、社会技術研究論文集、Vol. 11、pp.108-118、2014。
- 9) 田中恒夫、小池範幸、佐藤孝志、新井忠男、平靖之: 電解法による畜産排水からのリン酸塩の回収、水環境学会誌、Vol. 32 (2)、pp.79-85、2009。
- 10) J.B.K. Park, R.J. Craggs, A.N. Shilton: Recycling algae to improve species control and harvest efficiency from a high rate algal pond, *Water Research*, Vol.45, pp.6637-6649, 2011。
- 11) S. Chinnasmy, A. Bhatnagar, R.W. Hunt, K.C. Das: Microalgae cultivation in a wastewater dominated by carpet mill effluents for biodiesel application, *Bioresource Technology*, Vol.101, pp.3097-3105, 2010。
- 12) S. Cho, T.T. Luong, D. Lee, Y.K. Oh, T. Lee: Reuse of effluent water from a municipal wastewater treatment plant in microalgae cultivation for biofuel production, *Bioresource Technology*. Vol.102, pp.8639-8645, 2011。
- 13) E.B. Sydney, T.E. da Silva, A. Tokarski, A.C. Novak, J.C. de Carvalho, A.L. Woiciechowski, C. Larroche, C.R. Soccol: Screening of microalgae with potential for biodiesel production and nutrient removal from treated domestic sewage. *Applied Energy*. Vol.88 (10), pp.3291-3294, 2011。
- 14) I.L.C. Drexler, C. Joulstra, A. Prieto, R. Bair, D.H. Yeh: Algae Sim: A model for integrated algal biofuel production

- and wastewater treatment, *Water Environment Research*, Vol.86, pp.163-176, 2014.
- 15) American Public Health Association Publication (APHA): Standard methods for the examination of water and wastewater, nineteenth ed. Washington, DC, USA, 2005.
- 16) 建設省技術管理業務連絡会水質部会、河川水質試験方法 (案)、1997.
- 17) Japanese Standards Association, Japan Coal Energy Centre: Coal and coke determination of gross calorific value by the bomb calorimetric method, and calculation of net calorific value, Tokyo, 2003.
- 18) 気象庁、過去の気象データ検索、
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/>
- 19) M.A. Gates, A. Rogerson, J. Berger, Dry to wet weight biomass conversion constant for *Tetrahymena ellioti* (Ciliophora, Protozoa), *Oecologia*. Vol.55, pp.145-1448. 1982.
- 20) H. Tsuno, T. Hidaka, S.E. Jorgensen: 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.
- 21) D.M. Di Toro, D.J. O'Connor, R.V. Thomann: A dynamic model for the phytoplankton population in the Sacramento San Joaquin Delta, *Advanced Chemistry Ser.*, Vol.106, pp.131-180, 1971.
- 22) T. Andersen, D.O. Hessen: Carbon, nitrogen and phosphorus content of freshwater zooplankton, *Limnology and Oceanography*. Vol.36 (4), pp.807-814, 1991.
- 23) S. Markager, W.F. Vincent: Spectral light attenuation and absorption of UV and blue light in natural waters. *Limnology and Oceanography*. Vol.45 (3), pp.642-650, 2000.
- 24) R.J. Geider, H.L. macIntyre, T.M. Kana: A dynamic regulatory model of phytoplanktonic acclimation to light, nutrients, and temperature. *Limnology and Oceanography*. Vol.43 (4), 679-694, 1998.
- 25) 津野洋、浦邊真郎、吉川克彦、草野文嗣: 数理モデルによるエアリフト循環の余呉湖水質改善効果の予知に関する研究、*水環境学会誌*, Vol.19 (3), pp.228-235, 1996.
- 26) 奥川光治、宗宮功: 数理モデルによる富栄養化のシミュレーション解析、*土木学会論文報告集*, Vol.337, pp.119-128, 1983.
- 27) J.T.O. Kirk: *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*, Cambridge University Press., U.K., 1983.
- 28) E. Evervecq, V. Gosselain, L. Viroux, J.P. Descy, Potamon: A dynamic model for predicting phytoplankton composition and biomass in lowland rivers. *Water Research*. Vol.35 (4), pp.901-912, 2001.

STUDY ON TECHNOLOGY FOR RECOVERY, PRODUCTION, AND UTILIZATION OF SEWAGE RESOURCES

Budgeted : Grants for operating expenses

Research Period : FY2011–2015

Research Team : Materials and Resources
Research Group

Author : TSUMORI Jun, HIDAKA Taira,
TAKABE Yugo

Abstract: In order to develop technology for recovery, production and utilization of sewage resources, phosphorus recovery by electrolysis and microalgae cultivation for energy usage were discussed. Phosphorus recovery by electrolysis of centrate using a platinum coated titanium electrode decreased as extension of the electrolysis period, and it was probable that maintenance and reparation of the phosphorus recovery capacity in the cathode is important for the recovery enhancement. Microalgae cultivation under natural conditions was conducted with raceway reactor in which secondary effluent was flowed, and it was suggested that CO₂ addition enhanced the higher heating value in the cultured microalgae. In addition, mathematical model of the microalgae growth in which influences of variations of natural conditions on the growth were incorporated was developed, and its reproducibility was suggested, based on the comparison to the measured values from the raceway reactor.

Key words: electrolysis, phosphorus, microalgae cultivation, CO₂ addition, mathematical model