

## 〈研究発表〉

## 下水道ブルーカーボン構想

## ——沿岸生態系促進のための栄養塩供給管理技術の開発——

「ブルーカーボン促進のための栄養塩供給管理」プロジェクトチーム

三 宮 豊<sup>1)</sup>, 山野井 一郎<sup>1)</sup>, 圓 佛 伊智朗<sup>1)</sup>, 田 中 宏 明<sup>2)</sup>  
 桑 江 朝比呂<sup>3)</sup>, 田 村 一 郎<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> ㈱日立製作所 環境システム研究部

(〒319-1292 茨城県日立市大みか町7-1-1 E-mail: yutaka.sangu.nf@hitachi.com)

<sup>2)</sup> 信州大学

(〒380-8553 長野県長野市若里4-17-1 E-mail: hiroakitanaka@shinshu-u.ac.jp)

<sup>3)</sup> 港湾空港技術研究所

(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1 E-mail: kuwae@blueeconomy.jp)

<sup>4)</sup> ㈱東京設計事務所

(〒100-0013 東京都千代田区霞が関3-7-1 E-mail: ichiro\_tamura@tokyoengicon.co.jp)

## 概 要

下水道はこれまでに貢献してきた公共用水域の水質保全と同時に、持続可能な水産資源が育める豊かな海への貢献を期待されている。下水処理水由来の窒素やリンの栄養塩類は、沿岸域での海草や海藻、植物プランクトンなどの生産によるCO<sub>2</sub>吸収・貯留を促進する重要な要素と考えられる。適切な時期と場所に応じた下水処理水質を制御できる栄養塩供給管理技術を開発することで、豊かな海だけでなくブルーカーボンへの活用も期待できる。本発表では、下水道からの栄養塩類の適切な供給を進め、沿岸生態系によるCO<sub>2</sub>吸収・貯留を促進する制御・計測技術の開発を提案する。

キーワード：ブルーカーボン、ネガティブエミッション技術、栄養塩供給管理

原稿受付 2023.7.11

EICA: 28(2・3) 98-102

## 1. 下水道分野の脱炭素化と豊かな海に向けた取り組み

## 1.1 下水道分野の脱炭素化

脱炭素社会（カーボンニュートラル達成）に向け、下水道分野では2030年度までに温室効果ガス排出量を208万t（2013年比）削減する中間目標が掲げられ、脱炭素化に向けた取り組みが開始されている。報告書「脱炭素社会を牽引するグリーンイノベーション下水道」では、下水道分野として、(1) 省エネ化によるCO<sub>2</sub>削減、(2) 下水汚泥の高温焼却によるN<sub>2</sub>O削減、(3) 下水汚泥のエネルギー化、(4) 再生可能エネルギーの導入の主要施策が示された<sup>1)</sup>。これらの施策は、運転管理の効率化や省エネルギー機器の導入による省エネ化、汚泥焼却での高温焼却による温室効果ガス（GHG）の削減、並びに下水資源の利活用によるエネルギー化と再生可能エネルギーの導入が核となる。しかし、2050年のカーボンニュートラル達成に向けては、下水道分野も残余排出GHGへの対応が避けられず、大気中のCO<sub>2</sub>を回収・吸収するネガティブエミッション技術（NETs）の導入が必要である<sup>2)</sup>。

## 1.2 栄養塩の能動的運転管理へのインセンティブ

脱炭素化とともに、下水道分野では持続可能な水産資源が育める豊かな海への貢献が期待されている。これまでに下水道の整備や水質規制などが進み、公共用水域の水質は大きく改善されてきたが、水域によっては冬期の栄養塩不足によるノリの色落ちなど、新たな課題が生じている。放流水に含まれる栄養塩類は水生生態系の生息・生育にとって欠かせないものであり、水質が良好な状態で保全され、生物多様性を確保しつつ、生物生産性なども適切に確保された豊かな海をめざすには、場所と時期をきめ細かに適切に水質管理することが必要である。改正瀬戸内海環境保全特別措置法では、特定の海域への栄養塩類の供給を可能とする制度創設とともに、再生・創出された藻場・干潟も保全地区として指定可能とすることで、生物多様性保全やGHGの吸収源（ブルーカーボン）としての役割も期待している。

一方、国土交通省では、下水道を管理する地方公共団体が栄養塩類の増加運転に取り組む際の参考となるように、2023年3月に「栄養塩類の能動的運転管理ガイドライン（案）」<sup>3)</sup>を公開した。このガイドラインにより、水質環境基準の達成・維持が担保でき、地

先の周辺水質等へ大きな影響が想定されない水域で、地域の実情等を十分に勘案したうえで、栄養塩類の能動的運転管理が求められる下水処理場は、今後拡大することが予想される。しかし、能動的運転管理には、技術面や維持管理面等での負担を下水処理場に与える可能性がある。そこで、下水道による豊かな海への貢献と脱炭素への貢献を同時に実現する施策として、沿岸生態系によるブルーカーボンを活用する「下水道ブルーカーボン構想」を以下のように新たに提案する。

### 1.3 下水道ブルーカーボン構想

ブルーカーボンとは、海草（アマモなど）や海藻、植物プランクトンなど海の生物の作用で海中に取り込まれ、草藻体由来の有機物として海底土壌、深海に蓄積する炭素のほか、草藻体から放出された難分解性の溶存有機物として海水中に蓄積する炭素のことで、大気中のCO<sub>2</sub>を除去するNETs技術である。Fig. 1に下水道ブルーカーボン構想を示す。この構想は、下水道分野で栄養塩類の適切な供給管理を実現し、沿岸生態系によるCO<sub>2</sub>吸収・貯留の促進を図るものである。実現に向けては、沿岸海域の環境保全およびブルーカーボンクレジットの認証に必要なMRV（計測・報告・検証）に資するブルーカーボン計測技術、下水道での能動的管理の技術開発や、ブルーカーボン計測技術から得られた情報に基づき炭素・栄養塩類の動態評価・管理データでCO<sub>2</sub>吸収促進・認証を支援するブルーカーボン管理・制御技術、さらに藻場創成などのハード施策、社会実装が重要と考えられる。以上のような技術を開発することで、経済面では大規模な下水処理施設の増設や改修を伴わずに、下水道分野での脱炭素施策を進めることが可能となる。さらに、例えば窒素の海域への供給増量を狙った硝化抑制運転による送風量削減で、省コストにつながる副次的な効果が期待できる可能性もある。環境面では1.1で示した脱炭素貢献アプローチに下水道ブルーカーボンを加えることで、カーボンニュートラル達成への新たな選択肢を

提供可能とする。社会面ではとくに貧栄養化に苦慮する海域において、生物生産性の拡大など水産業を介した地域経済活性化や、生物多様性の向上ときれいで豊かな海の維持・拡大による地域観光資源の活性化にも貢献するものと期待される。

下水道ブルーカーボン構想を実現するため、2023年3月にはJBE（ジャパンブルーエコノミー組合）傘下のBERG（ジャパンブルーエコノミー推進研究会）において「ブルーカーボン促進のための栄養塩供給管理」プロジェクトを立ち上げ、社会実装に向けた検討を開始した。

## 2. 構想実現のための技術の検討

Fig. 2に下水道ブルーカーボン構想に対応する具体的技術の体系を示す。技術体系は（1）ブルーカーボン管理・制御技術、（2）ブルーカーボン計測技術、（3）カーボンクレジット認証対応技術、（4）栄養塩類供給効率化技術から構成される。本報告では、各技術について、とくに（1）と（2）を重点的に説明する。

### 2.1 ブルーカーボン管理・制御技術

Fig. 3にブルーカーボン管理・制御技術の概要を示す。下水道分野でブルーカーボンの活用に貢献する場合、下水処理場の運転管理だけでなく、放流方法の検討、放流先となる海域も含めた評価や管理が必要となる。このための技術の要件は、炭素や栄養塩類の動態を下水処理場～海域で把握しながら、CO<sub>2</sub>吸収と貯留を促進し、最終的にはカーボンクレジットとして認証までを達成できるようにすることである。本提案では、これらを実現する主たる技術として、ブルーカーボンエンジニアリング/モニタリング（BCE/BCM）と海域栄養塩類供給制御を提案する。

BCE/BCMは、下水道による能動的栄養塩管理運転（季節別運転）による放流先の湾灘沿岸域でのブルーカーボン吸収効果を定量化し、可視化する技術で

■基本構想：下水処理水質制御によって栄養塩類の適切な供給管理を実現し、沿岸生態系によるCO<sub>2</sub>吸収・貯留を促進

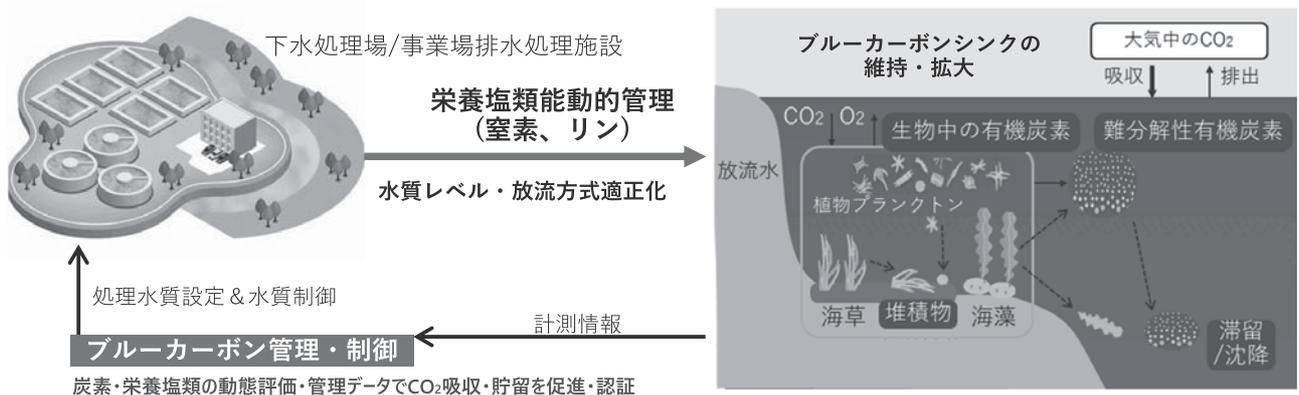


Fig. 1 Concept of sewerage blue carbon

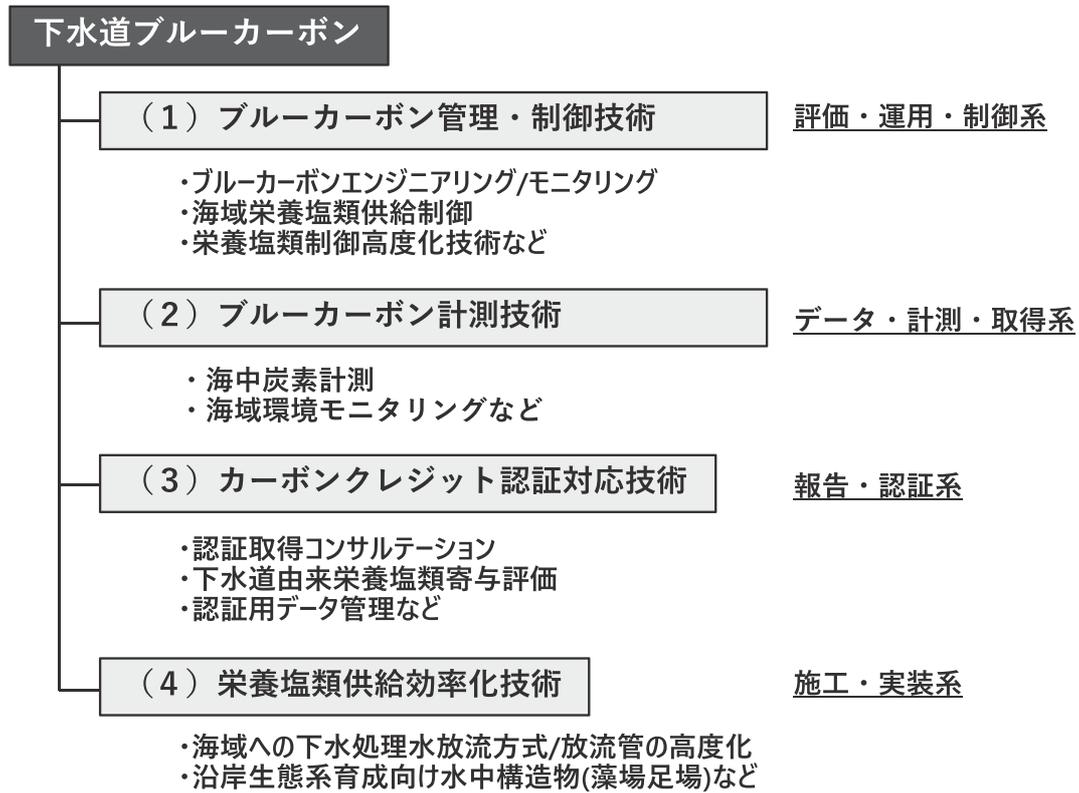


Fig. 2 Specific technology system for sewage blue carbon

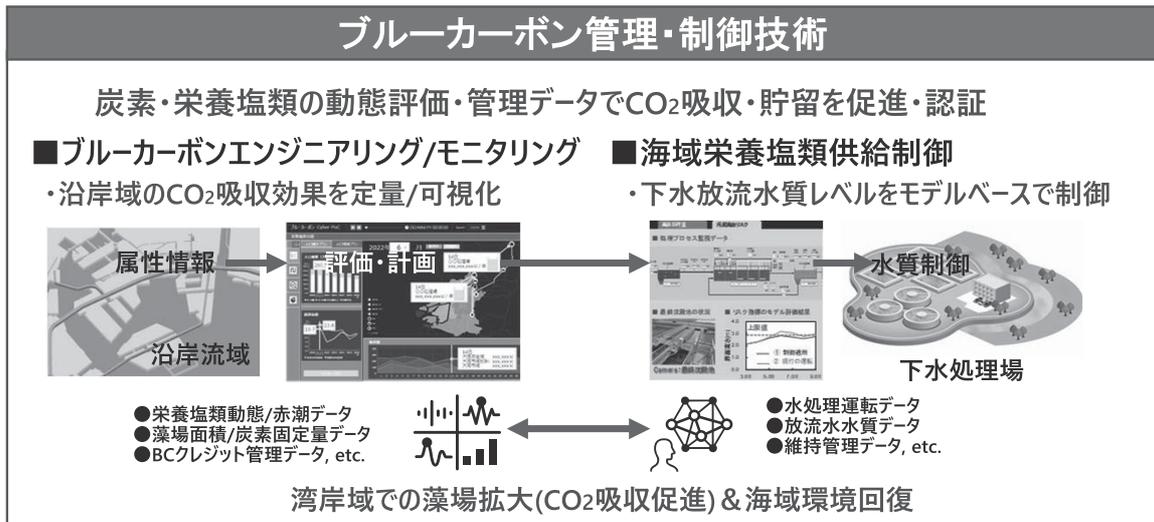


Fig. 3 Overview of blue carbon management and control technology

ある。

提案技術のうち、BCEは、対象とする湾灘の流域の属性情報等に基づいて、流域での栄養塩類の排出源、排出量および湾灘への流達量を評価し、総流達量に占める下水処理場放流水の寄与の割合を評価する。さらに、2.2のブルーカーボン計測技術で取得する海域データに基づいて、海域に適切な栄養塩類の供給量を設定し、放流方式の検討や放流水質の目標値を設定する。また、BCMは、継続的に取得された海域データに基づいて、栄養塩類供給による藻場面積拡大やCO<sub>2</sub>貯留量などの効果を定量的に評価する。さらに、

栄養塩類供給量の増加による副作用として懸念される赤潮など、海域環境に悪影響を及ぼす関連データ項目を監視し、栄養塩類供給量の管理にフィードバックする。

Fig. 3の海域栄養塩類供給制御は、栄養塩類の供給源である下水処理場において、時期に合わせた栄養塩供給量の変動に対して年間を通じて安定して運転・制御する栄養塩類供給制御CPS(Cyber Physical System)と運転シミュレーションによる栄養塩類制御高度化技術からなり、下水道分野の脱炭素と水質管理・維持管理の両立をめざす。

栄養塩類供給制御 CPS は、一つの下水処理場全体を水処理と汚泥処理を含めて CPS としてモデル化し、能動的栄養塩類管理に向けた下水処理プロセスの各系列の最適な水質目標値を設定可能にする要素技術である。また、栄養塩類制御高度化技術は、計測・制御系の ICT 機器や AI 等の機械学習機能、さらに水質を推定するシミュレーションを導入することで、処理水質の安定化や栄養塩類の増加期と回復期の期間短縮を目的とした運転制御の高度化・安定化を可能にする要素技術である。

これらの提案技術を開発することで、下水処理場を安定かつ効率的に管理・制御できる。

## 2.2 ブルーカーボン計測技術

炭素吸収源となる藻場などの生育を促進し、クレジット認証を取得する場合、大気中の CO<sub>2</sub> の正味吸収量あるいは海洋中への炭素貯留量の計測が必要となる。計測対象は、貯留安定性の高い炭素形態である堆積物中有機物や海水中の難分解性有機物が想定される。すでにクレジット認証に認められている堆積物中有機物は、ダイバーによる潜水調査や空中写真等の計測手法が現在適用されるが、コストや精度の点で一長一短がある。また、対象の沿岸海域へ流入する栄養塩等の変化が炭素の吸収・貯留以外の生態系や水環境へ及ぼす影響も監視する必要がある。このためブルーカーボン計測技術の要件は、対象の沿岸海域におけるブルーカーボンによる炭素の吸収・貯留量や環境の状態変化をオンサイトかつオンラインで半自動的かつ低コストに、空間分布の時系列変化として可視化することである。Fig. 4 にブルーカーボン計測技術の概要を示す。藻場などでの炭素の吸収・貯留量、難分解性有機炭素や海域環境の指標を海上で連続監視することが想定される。

## 2.3 カーボンのクレジット認証対応技術

能動的な栄養塩類管理など、ブルーカーボンに関わる施策にてカーボンのクレジット認証の取得をめざすと、所定の手順に準拠したデータ取得と評価によって、当該施策の炭素吸収・貯留への寄与の度合いを客観的に定量化する MRV (Measurement, Reporting and Verification; 計測・報告・検証) への対応が必須である。計測 M への対応は、(2) ブルーカーボン計測技術で上述したとおりであるが、合わせて報告 R と検証 V に対応する技術を準備する必要がある。すでに適用実績のある認証用データ管理 (改ざん防止措置など) の導入と合わせて、下水道由来の栄養塩類による寄与評価など、下水道分野に固有の検証手順やコンサルテーション手順を具体化し、認証対応技術を確立する必要がある。

## 2.4 栄養塩類供給効率化技術

貧栄養化緩和や藻場維持・拡大に求められる適切な栄養塩類の供給にあたっては、供給量の管理だけでなく、放流方式の工夫なども効果的と考えられる。このような放流方式に求められる要件は、放流水中の栄養塩類が必要なエリアに適切に届くことである。これを実現するために、沿岸域拡散シミュレーションで評価して適切な放流地点を評価する技術や放流管などの形状設計などを検討し、より効率的な栄養塩類の供給技術を具体化する。

## 3. 結 言

「ブルーカーボン促進のための栄養塩供給管理」プロジェクトでは、2050 年のカーボンニュートラル達成に向けて、下水道分野での新たな施策として必要となる NETs 技術の一つであるブルーカーボン活用技

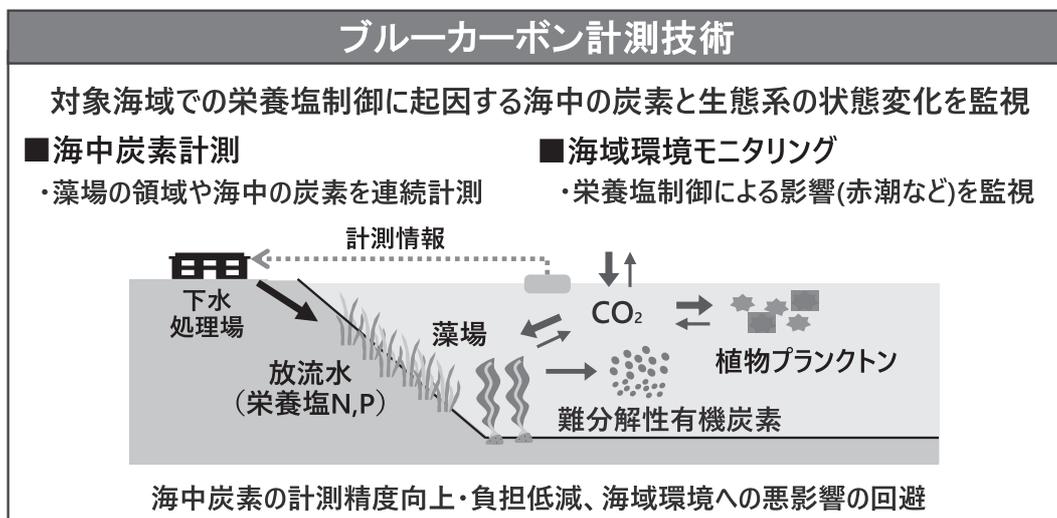


Fig. 4 Overview of blue carbon measurement technology

術に着目した。下水道分野においては、これまでに貢献してきた公共用水域の水質保全と同時に、持続可能な水産資源が育めるきれいで豊かな海への貢献、さらにブルーカーボンへの貢献も期待される。下水道分野がブルーカーボンに貢献するためには、沿岸海域の環境保全およびブルーカーボンクレジットの認証に必要なMRV（計測・報告・検証）に資するブルーカーボン計測技術、そこから得られた情報に基づき炭素・栄養塩類の動態評価・管理データでCO<sub>2</sub>吸収促進・認証を支援するブルーカーボン管理・制御技術、カーボンクレジット認証対応技術、栄養塩類供給効率化技術が必要である。本プロジェクトでは、これらの課題解決のための議論を重ね、下水道ブルーカーボン構想の実現をめざす。

#### 参考文献

- 1) 脱炭素社会への貢献のあり方検討小委員会（国交省）：脱炭素社会を牽引するグリーンイノベーション下水道（2022），  
[https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/mizukokudo\\_sewerage\\_tk\\_000734.html](https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/mizukokudo_sewerage_tk_000734.html)
- 2) 経済産業省 HP：2050年カーボンニュートラル（CN）の達成に必要な、ネガティブエミッション技術（NETs）の社会実装・産業化に向けた方向性について（2023），  
<https://www.meti.go.jp/press/2023/06/20230628003/20230628003.html>
- 3) 国交省 HP：栄養塩類の能動的運転管理の効果的な実施に向けたガイドライン（案）（令和5年3月），  
[https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/mizukokudo\\_sewerage\\_tk\\_000379.html](https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/mizukokudo_sewerage_tk_000379.html)
- 4) ジャパンブルーエコノミー技術研究組合：Jブルークレジット<sup>®</sup>認証申請の手引き Ver. 2.2.1（2023），  
[https://www.blueeconomy.jp/files/jbc2022/20230331\\_J-BlueCredit\\_Guideline\\_v2.2.1.pdf](https://www.blueeconomy.jp/files/jbc2022/20230331_J-BlueCredit_Guideline_v2.2.1.pdf)