

(29) 汚泥処理返流水の栄養塩除去への効果的な利用方策に関する研究

Effective use of return flow from sludge treatment process to nutrient removal

成田 裕樹*, 船水 尚行*, 高桑 哲男*

Hiroki NARITA*, Naoyuki FUNAMIZU*, and Tetsuo TAKAKUWA*

ABSTRACT: Characterization of organic matter in return flow from sludge treatment processes is essential for their effective to use nutrient removal process. This characterization showed that (1) the return flows from sludge thickening unit and dewatering unit contain higher percentage of readily biodegradable organic matter than sewage, and (2) it is not adequate to use the return flows from anaerobic digestion unit and sludge incineration process because of their low concentration of biodegradable organic matter, high nitrogen content, and high soluble inert organic matter. Simulation based on the Activated sludge model showed that (1) separate application of return flow in a two step anoxic-aerobic nitrogen removal process is effective, such that sewage is fed to first anoxic zone whereas the return flow is fed to second anoxic zone; and (2) the centralized sludge treatment plant processing the sludge from 650,000m³/day-sewage treatment is required to treat the nitrogen contained in 50,000m³/day-sewage.

KEY WORDS: nutrient removal, return flow from sludge treatment process, characterization of organic matter, activated sludge model, centralized sludge treatment

1. はじめに

嫌気・無酸素・好気法やステップ流入式多段硝化脱窒法は、下水の栄養塩除去に対して経済的なプロセスとして注目されている。これらのプロセスは、好気槽において自栄養細菌による硝化反応を、無酸素槽において他栄養細菌による脱窒反応を期待するものである。他栄養細菌による無酸素槽での脱窒反応は、外部からの水素供与体を必要とするが、通常これらは流入下水中有機物により賄われている。しかし、都市下水における流入水中の有機物は、除去窒素量に対して不足しがちであることが報告されている¹⁾。

一方、汚泥処理工程において発生する返流水は有機物濃度が高く²⁾、下水処理場内にて利用可能な有機物源と考えることができる。また、都市部では汚泥処理の集約化が進められてきており、数箇所の下水処理場発生汚泥の処理を一括して行っている。このようなケースでは、集約処理場において多量の返流水が発生している。

このような汚泥処理系返流水の有効利用方策の検討の一つとして、数学モデルを利用したプラントシミュレーションが有効と考えられる。特に IWA の活性汚泥モデル³⁾は、下水処理プラントにおける処理予測に用いられており、その有効性が報告されている^{4),5)}。

このシミュレーションを行うためには、下水及び返流水の有機物を生物分解性の観点から評価する必要がある。しかし、このような観点で返流水有機物を評価している例は少ない。

本研究では、下水汚泥処理の過程で発生する各種汚泥処理返流水について有機物の評価を行い、シミュレ

* 北海道大学工学研究科都市環境工学専攻 (Department of Sanitary and Environmental Engineering, Hokkaido

ーションにより栄養塩除去に対する有機物源としての利用方策について検討を行った。

2. 方法

2.1 測定対象下水及び返流水

測定対象とした下水及び返流水を表-1 に示す。流入下水のみ 24 時間のコンポジットサンプル，それ以外はスポットサンプルを使用した。また，サンプリングを行った各処理施設の概要を表-2 に示す。なお，污泥濃縮工程では機械濃縮も考えられるが，本研究では調査可能であった重力濃縮の測定結果を主に用いた。

表-1 測定対象下水及び返流水

対象	内容
流入下水	生物反応槽流入下水。
濃縮槽越流水	最初沈殿池及び最終沈殿池引抜污泥の重力濃縮槽からの越流水。
脱水分離液	濃縮污泥の脱水分離液。
消化槽脱離液	濃縮污泥の嫌気消化脱離液。
焼却系排水	脱水ケーキ焼却の際発生する排水。

表-2 処理施設の概要

処理施設	水処理方式	污泥処理方式	採取時期
A 市 A 処理場	分流式， 標準活性污泥法	重力濃縮，薬注加圧脱水	12 月
B 市 B 処理場	分流式， 標準活性污泥法	初沈重力濃縮，余剰機械濃縮， 消化，薬注脱水	10 月
A 市污泥処理センター	—	重力濃縮，薬注脱水，焼却 (污泥集約処理)	12 月

2.2 下水及び返流水有機物の測定

流入下水及び各種返流水有機物の分類は，活性污泥モデル³⁾の分類に従い行った。ここでの有機物の分類内容を表-3 に示す。

表-3 有機物の分類内容

記号	内容
S _F	容易に分解する有機物。他栄養細菌に直接利用される。
S _A	発酵産物。酸発酵産物の主成分のうち，測定結果より本研究では酢酸とした。
S _I	難生物分解溶解性有機物。水処理施設で分解できない溶解性有機物。
X _I	難生物分解浮遊性有機物。水処理施設で分解できない浮遊性有機物。
X _S	遅い速度で分解する有機物。生物細胞外で加水分解を受けたのちに生物により分解可能となる有機物。高分子，コロイド，浮遊性有機物など。
X _H	他栄養細菌。無酸素条件及び好気条件で増殖可能であり，嫌気条件では発酵に関与する。

単位：gCOD/m³

この他に，リン蓄積菌 X_{PAO}，リン蓄積菌内有機物 X_{PHA}，自栄養細菌 X_{AUT}がある。

表-3 に示した各有機物の分類方法を以下に示す。

- 全有機物濃度, T·COD

二クロム酸カリウム法 COD により, 下水及び返流水中の全有機物濃度, T·COD を測定する。この方法ではほぼ全有機物を分解可能であると考えられるため, 各有機物成分 S_F , S_A , S_I , X_I , X_S , X_H , X_{PAO} , X_{PHA} , X_{AUT} と T·COD の間に以下の関係が成り立つ。

$$T·COD = S_F + S_A + S_I + X_I + X_S + X_H + X_{PAO} + X_{PHA} + X_{AUT} \quad (1)$$

- S_F

活性汚泥モデルでは, 微生物に直接利用される有機物成分を, S_F 及び S_A としている。これら 2 種類の有機物濃度の和は, 以下のようにして推定される。

試料下水あるいは返流水と, 試料下水に馴致されている活性汚泥 (返流水の場合は, 同処理場内活性汚泥), 及び硝化反応抑制のための ATU を密閉容器に入れ, 溶存酸素を飽和させた後, 酸素消費速度 (OUR) の経時変化を測定する。得られた OUR の経時変化パターンより, Gujer⁶⁾らの提案した方法に基づき, S_F と S_A の和を求める。

- S_A

イオンクロマトグラフにより, 有機酸を直接測定する。なお, 本研究においては酢酸以外の部分については検出限界以下であったので, 酢酸の定量値を S_A とした。

- S_I

試料下水及び返流水を $0.45 \mu m$ のメンブレンフィルターでろ過したものと活性汚泥を混合後, エアレーションし, 12 時間経過後の残存溶解性 COD (二クロム酸カリウム法による) 値を S_I の推定値とする。

- X_S

X_S の値は直接測定することが難しいため, S_F 及び S_A 測定時の OUR 経時変化を最も良く再現する X_S 値をシミュレーションにより定める⁶⁾。

- X_H

試料下水あるいは返流水と増殖基質としての酢酸ナトリウム, ATU を密閉容器に入れ, 溶存酸素を飽和させた後, 生物反応による酸素消費速度 (OUR) を測定する。この実験系では, 汚泥を添加しないので, 供試下水及び返流水中に存在した他栄養細菌が増殖する。OUR の経時変化の測定値を初期時刻に外挿して, 初期酸素消費速度を推定し, この値を他栄養細菌濃度に換算する⁶⁾。

- X_I

以上に, 下水及び返流水中有機物成分 9 種類のうち, 5 種類の推定法を示した。残りの 4 成分のうち, 自栄養細菌 X_{AUT} , リン蓄積に関係する X_{PAO} , X_{PHA} については, 存在量が³⁾わずかで無視可能と仮定³⁾できるので, 最後に残った X_I を, T·COD 値から S_F , S_A , S_I , X_S , X_H の値を差し引くことにより推定する。

2.3 シミュレーションモデル

シミュレーションは, 図-1 に示すプラントモデルを用いて行った。本モデルは, 生物反応槽及び最終沈殿池より構成される。プロセスは, 高い脱窒率が得られ, 水質の異なる流入原水の影響を確認するために, ステップ流入式多段硝化脱窒法とした。ステップ段数は, 船水ら⁷⁾の報告より 2 段とした。

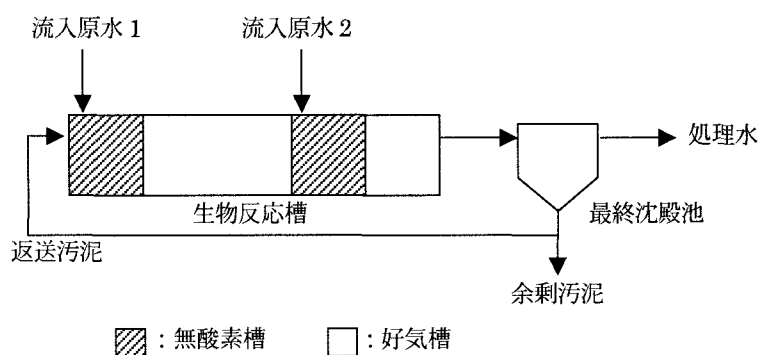


図-1 シミュレーションモデル

・生物反応槽モデル

生物反応槽は、各槽が完全混合槽 2 槽により構成されるものとして表現した。生物反応モデルには、IWA の活性汚泥モデル No.2^③を用いた。なお、モデル中のパラメータは 20℃における推奨値^③をそのまま用いた。

・最終沈殿池モデル

最終沈殿池モデルは、後段好気槽からの流出成分について、溶解性成分については処理水量、返送汚泥量及び余剰汚泥量に応じて流出するものとした。固形成分に関しては、処理場の実績値を参考に処理水 SS が 7g・TSS/m³ となるものとし、これを除いた全量を返送汚泥量及び余剰汚泥量として濃縮するものとした。また、最終沈殿池内での生物反応はないものとした。

・設定条件

設定条件を表-4 に示す。

表-4 設定条件

流入下水量	50,000m ³ /day
反応槽	
反応槽容量 (HRT)	16,667, 25,000, 33,333 m ³ /day (8, 12, 16 時間)
槽容積比 (様式)	1 : 2 : 1 : 1 (無酸素 : 好気 : 無酸素 : 好気)
好気槽 DO	3g・O ₂ /m ³ 一定制御*
汚泥管理	
汚泥返送比	50%**
汚泥引抜管理	後段好気槽 MLSS 2,500g/m ³ 一定制御**

* : 文献^⑦より。

** : 文献^⑨より。

3. 結果

3.1 下水有機物の測定結果

流入下水有機物の測定結果を表-5、図-2 に示す。流入下水 1, 2 とは、A 処理場において異なる日の流入

下水について測定したものである。

測定下水の全 COD は 132.9g-COD/m^3 及び 186.1g-COD/m^3 であった。生物が直接利用可能な有機物、 S_F+S_A の全 COD に対する割合は、いずれも約 5% であった。これに X_S を加えた値、つまり生物により利用可能な全有機物の全 COD に対する割合は 60 から 77% であった。

表-5 流入下水中有機物の測定結果

項目	単位	流入下水 1	流入下水 2
T-COD		132.9	186.1
X_I		26.8	30.0
S_I		12.1	7.2
X_H	g-COD/m^3	14.8	4.8
X_S		72.1	134.0
S_A		0.0	3.5
S_F		7.1	6.6
$\text{NH}_4\text{-N}$	g-N/m^3	29.4	31.0
$\text{NO}_3\text{-N}$		0.0	0.0
$\text{PO}_4\text{-P}$	g-P/m^3	3.0	3.0

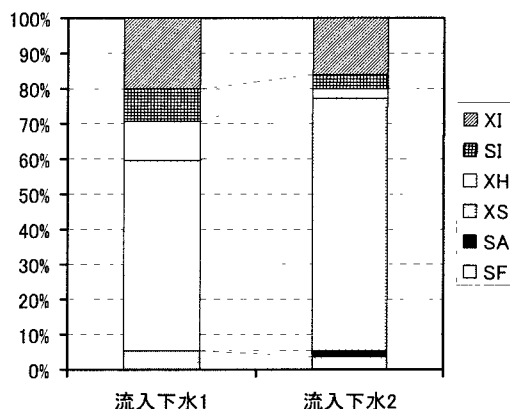


図-2 流入下水中有機物の測定結果

3.2 返流水有機物の測定結果

・濃縮槽越流水

濃縮槽越流水有機物の測定結果を表-6、図-3 に示す。濃縮槽越流水 1, 2 は、B 処理場において異なる日の測定結果である。濃縮槽越流水 3 は A 市汚泥処理センター、4 は A 処理場における越流水の測定結果である。

濃縮槽越流水の全 COD は、返流水 1, 2, 3, 4 の順に $276, 502, 768, 325\text{g-COD/m}^3$ であり、流入下水の全 COD と比較して高い値であり、ばらつきも大きかった。 S_F+S_A の合計値は、全 COD に対して 3~19% であり、流入下水に対して生物が直接利用できる有機物の割合が高かった。これに X_S を加えた値は 12~47% であった。

表-6 濃縮槽越流水有機物の測定結果

項目	単位	濃縮槽 越流水 1	濃縮槽 越流水 2	濃縮槽 越流水 3	濃縮槽 越流水 4
T-COD		276	502	768	325
X_I		162	94	340	127
S_I		25	87	65	44
X_H	g-COD/m^3	55	94	5	44
X_S		27	200	210	103
S_A		4	19	83	0
S_F		3	8	65	7
$\text{NH}_4\text{-N}$	g-N/m^3	—	—	25	—
$\text{NO}_3\text{-N}$		—	—	0	—
$\text{PO}_4\text{-P}$	g-P/m^3	—	—	6.3	—

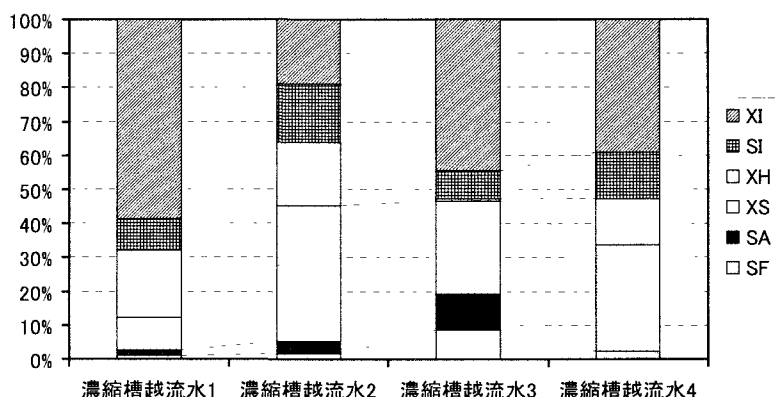


図-3 濃縮槽越流水有機物の測定結果

・脱水分離液

脱水分離液有機物の測定結果を表-7、図-4 に示す。脱水分離液 1 は A 処理場の塩化鉄系凝集剤を添加した加圧脱水法による分離液，脱水分離液 2 は A 市汚泥処理センターの高分子系凝集剤を添加した遠心脱水法による分離液である。

脱水分離液 1 の全 COD は $1,900\text{g-COD/m}^3$ ，脱水分離液 2 は $1,665\text{g-COD/m}^3$ であり，濃縮槽越流水と比較して数倍の濃度であった。脱水分離液 1 の S_F+S_A の全 COD に対する割合は 4.5 % であり，流入下水と同程度であった。これに対して脱水分離液 2 の同割合は 33.0% であり，非常に高かった。これに X_S を合計した値は，それぞれ 40.7 及び 81.1% であった。

表-7 脱水分離液有機物の測定結果

項目	単位	脱水分離液 1	脱水分離液 2
T-COD		1900	1665
X_I	g-COD/m^3	748	85
S_I		379	230
X_H		0	0
X_S		687	800
S_A		82	420
S_F		4	130
$\text{NH}_4\text{-N}$	g-N/m^3	—	16
$\text{NO}_3\text{-N}$		—	0
$\text{PO}_4\text{-P}$		—	13.5

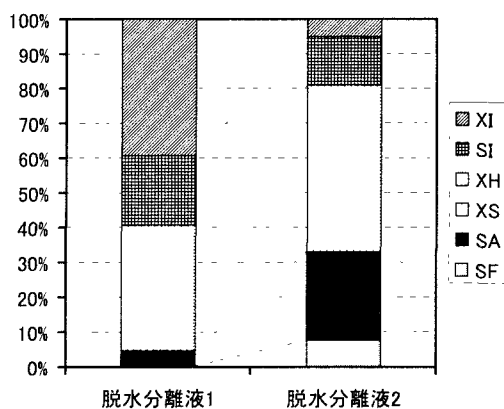


図-4 脱水分離液有機物の測定結果

・消化槽脱離液

消化槽脱離液の測定結果を表-8、図-5 に示す。サンプリングは B 処理場にて行った。

消化槽脱離液の全 COD は 685g-COD/m^3 であった。生物により分解可能な S_F , S_A , X_S は存在しなかった。よって，窒素除去に対する追加有機物源としての利用は不可能である。また，他栄養細菌 X_H も存在しなかった。

表-8 消化槽脱離液有機物の測定結果

項目	単位	消化槽脱離液
T-COD		685
X _I		548
S _I		137
X _H	g-COD/m ³	0
X _S		0
S _A		0
S _F		0
NH ₄ -N	g-N/m ³	—
NO ₃ -N		—
PO ₄ -P		—

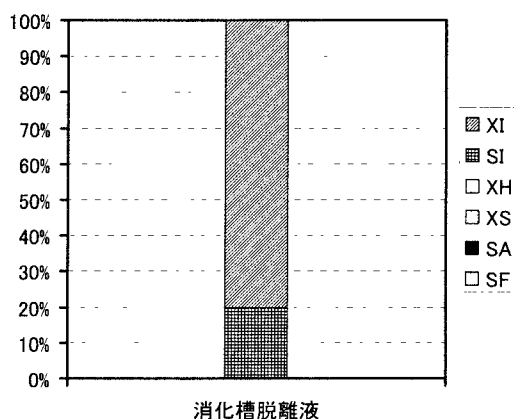


図-5 消化槽脱離液有機物の測定結果

・焼却系排水

焼却系排水有機物の測定結果を表-9、図-6に示す。焼却系排水としては、脱水ケーキ焼却処理により発生する、キャリアガス除湿塔排水及び冷却脱硫塔排水について測定を行った。サンプリングはA市污泥処理センターにて行った。

キャリアガス除湿塔排水の全CODは198g-COD/m³、S_F+S_Aの割合は14.1%であった。全CODが流入下水と同程度なのに対して、生物が直接利用可能な有機物の割合は多かったが、NH₄-Nが200g-N/m³と非常に高く、窒素負荷の増大を考えると、窒素除去に対する追加有機物源としての利用は困難であると考えられた。また、水処理系に混合する前に窒素除去を行う必要があると考えられる。

冷却脱硫塔排水の全CODは212g-COD/m³、S_F+S_Aの割合は24.2%であり、キャリアガス除湿塔排水と同様、生物が直接利用可能な有機物の割合は多かった。しかし、難生物分解溶解性有機物S_Iの割合が全体の52.4%と非常に高く、追加有機物源としての利用は困難であると考えられた。

表-9 焼却系排水有機物の測定結果

項目	単位	キャリアガス除湿塔排水	冷却脱硫塔排水
T-COD		198	212
X _I		110	24
S _I		40	110
X _H	g-COD/m ³	0	0
X _S		20	28
S _A		8	1
S _F		20	49
NH ₄ -N	g-N/m ³	220	0
NO ₃ -N		12	17
PO ₄ -P		2.2	0

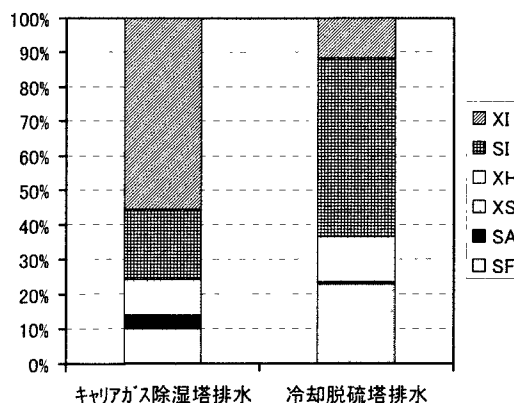


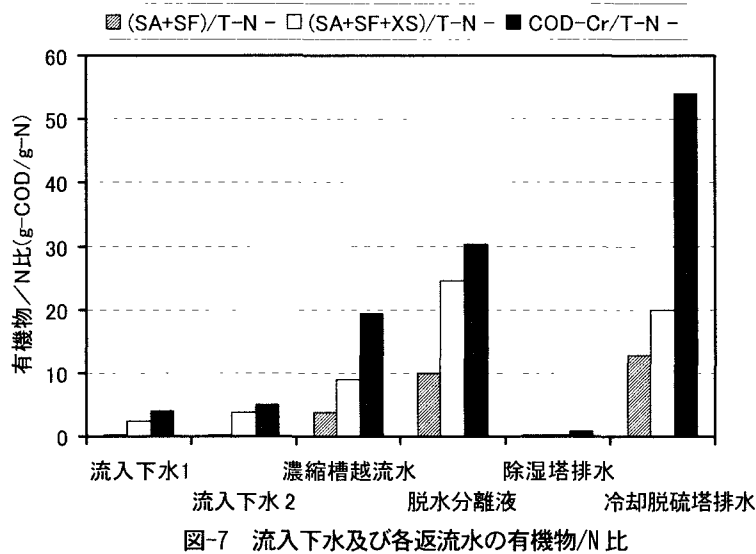
図-6 焼却系排水有機物の測定結果

以下の計算には、污泥集約処理の場合を想定し、A市污泥処理センターの返流水測定結果を用いた。

3.3 流入下水及び各返流水の有機物/N比

測定した流入下水及び各返流水の T-COD/T-N 比, (S_F+S_A)/T-N 比, (S_F+S_A+X_S)/T-N 比を図-7 に示す。
流入下水の(S_F+S_A+X_S)/T-N 比は 2.3 及び 3.9 g-COD/g-N, 濃縮汚泥越流水の同比は 9.0 g-COD/g-N, 脱水分離液では 24.5 g-COD/g-N であった。

Kuba ら¹⁰⁾によれば、嫌気・好気法といった栄養塩除去プロセスにおいて必要な有機物量は、窒素及びリン同時除去の場合 7.4g-COD/g-N, 窒素除去に対して 4.0g-COD/g-N とされている。この値によれば、流入下水の有機物量は目的とする窒素除去に対して不足することになる。濃縮汚泥越流水及び脱水分離液有機物/N比は、上記必要割合を超えているため、これらの返流水を流入下水と同時に投入することにより流入水有機物/N比を上げ、有機物を補うことができると考えられる。



3.4 必要返流水量の検討

利用可能な返流水量の検討を行うために、汚泥発生量と返流水量の傾向を調査した。図-8 に A 市内の 4 処理場における実績値を示す。

図より、汚泥発生量と返水量との間には正の相関があり、汚泥発生量に対する濃縮槽越流量は約 93%, 脱水分離液は約 13%であった。流入下水量及び汚泥発生量の実績値を表-10 に示す。流入下水量に対する汚泥発生量は平均 4.3%であった。これより、流入下水量に対する濃縮槽越流量は約 4%, 同じく脱水分離液量は約 0.6%であると推定できる。

表-10 流入下水量及び汚泥発生量					
	A 処理場	B 処理場	C 処理場	D 処理場	平均値
流入下水量	113,000	34,700	104,000	171,000	
汚泥発生量	3,200	1,100	7,000	7,800	
汚泥発生／流入下水量比	0.028	0.032	0.067	0.046	0.043

単位：m³/day

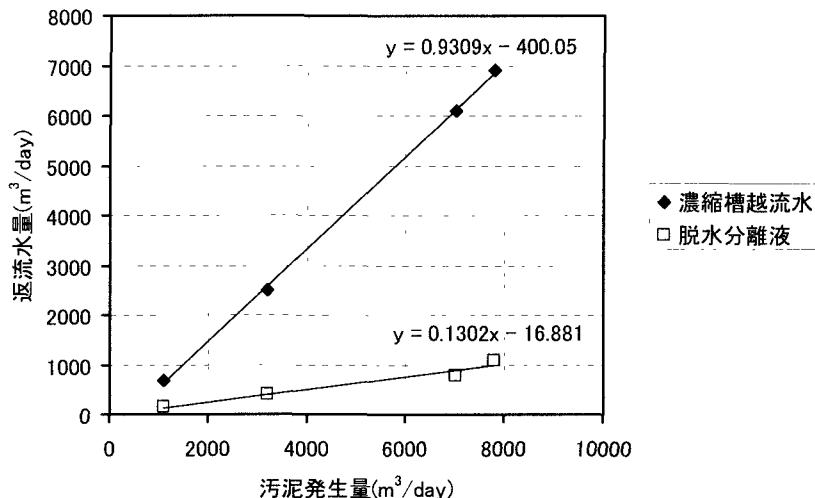


図-8 汚泥発生量と返流水量

次に、汚泥集約処理による返流水の利用を想定し、流入下水に任意量の返流水を加えた場合の窒素及び有機物量を図-9 に示す。ここでの流入下水量は 50,000 m³/day とした。なお、返流水は濃縮槽越流水及び脱水分離液を用いるものとした。図中の各点は、処理下水量 50,000 m³/day, 250,000 m³/day, 500,000 m³/day, 750,000 m³/day に対して発生した返流水量を、流入下水量 50,000 m³/day に加えた場合を示す。また、3.3 で述べた有機物/N 比=4.0 及び 7.4(g-COD/g-N) も図中に示した。

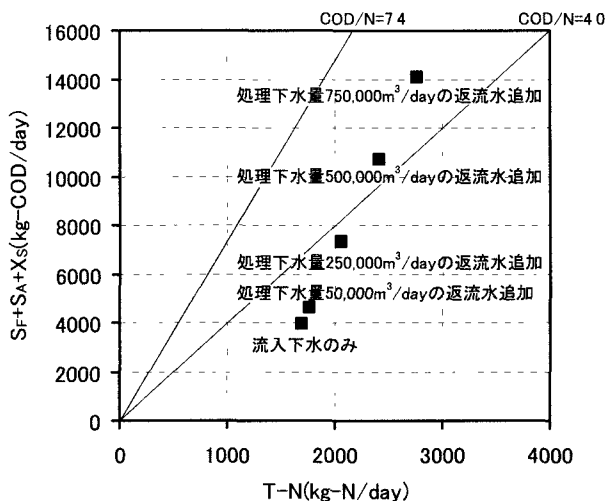


図-9 流入原水の T-N 及び $S_f+S_a+X_s$ 量

図より、処理下水量 500,000 m³/day に対して発生した返流水を 50,000 m³/day の流入下水に追加することで、有機物/N 比を 4 以上とすることができる。

3.5 返流水投入位置の影響

ステップ流入式多段硝化脱窒法の処理水 $\text{NO}_3\text{-N}$ は、完全硝化、完全脱窒を前提とした場合、最終好気槽における硝化量に比例する。つまり、最終段無酸素槽へ投入する T-N が低い方が処理水 T-N が低い。通常、

後段への投入TN量を減少させることは、有機物量も同時に減少させることとなり、後段無酸素槽での脱窒量を低下させることになる。しかし、返流水は有機物/N比が流入下水と比較して高いため、後段での必要有機物量を確保しつつ、処理水窒素濃度を低くできると考えられる。このことを以下のようなシミュレーションにより確認した。

返流水は、濃縮槽越流水及び脱水分離液を用いることとし、投入量を10,000、20,000、30,000m³/dayの3段階とした。投入方法は、流入下水に返流水を均等混合したものを前段及び後段無酸素槽へ投入した場合と、流入下水を前段へ、返流水を後段無酸素槽へ投入した場合を想定した。計算結果を図-10に示す。

いずれの場合も、返流水投入量の増加に伴い脱窒量が増加するが、返流水を後段に投入した場合の方が脱窒量が多く、処理水NH₄-N、NO₃-Nともに低いことがわかる。

以上より、返流水の水質組成が流入下水とは異なることから、後段への単独投入が効果的となることがわかった。

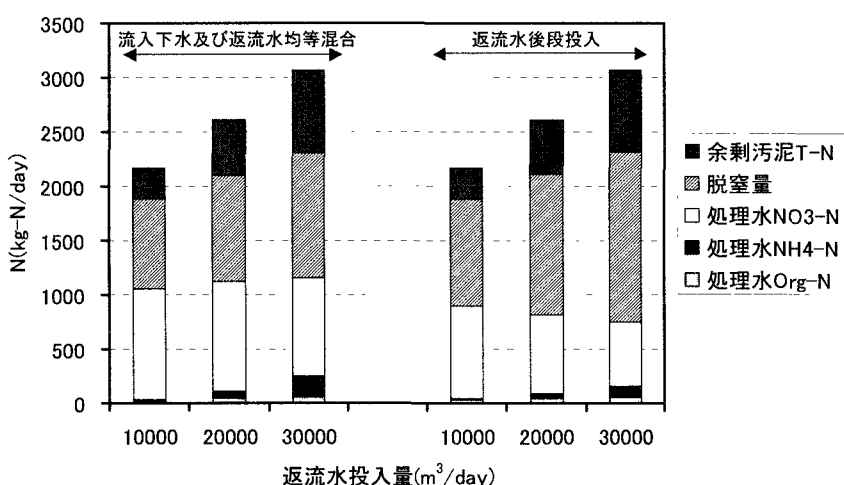


図-10 返流水投入量とN収支

3.6 返流水投入量と窒素除去量の関係

汚泥集約処理により発生した返流水の利用を想定し、有効利用可能量についてシミュレーションにより検討を行った。

シミュレーションは、流入下水を前段無酸素槽へ、返流水を後段無酸素槽へ投入するプロセスについて、返流水投入量を0～40,000m³/dayまで増加させて行った。流入下水量は50,000m³/dayとし、反応槽の滞留時間は8、12、16時間とした。計算結果を図-11に示す。図中には、返流水量を得るための処理下水量も示した。

返流水投入量が増加するにつれ、脱窒量も増加する傾向であったが、滞留時間8時間のケースでは、返流水投入量40,000m³/dayにおいて脱窒量の低下が見られた。これは、反応容積の減少に伴いSRTが短くなり、硝化量が低下したためである。滞留時間12時間以上のケースでも、同様の理由で処理水NH₄-Nが高い結果であった。

以上のことから、流入下水50,000m³/dayに対して30,000m³/day程度の返流水投入が有効であると考えられる。30,000m³/dayの返流水は、処理下水量655,000m³/dayからの発生量に相当する。

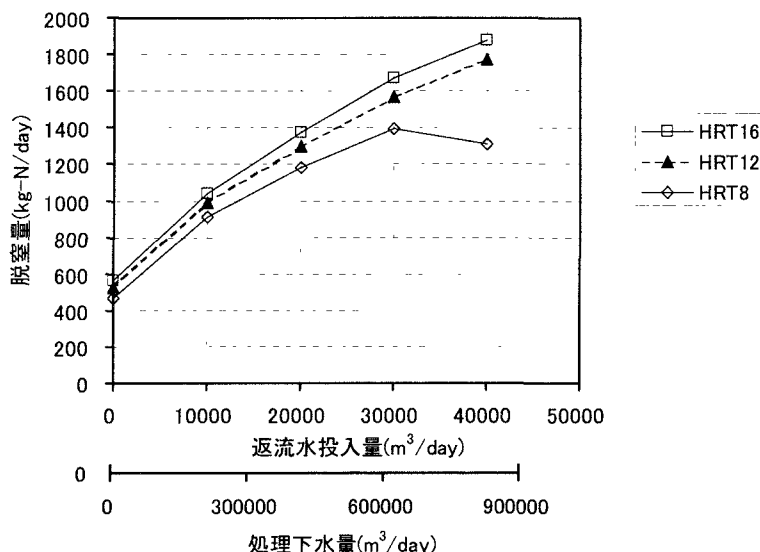


図-11 返流水投入量と脱窒量

4. まとめ

ステップ流入式多段硝化脱窒法の窒素除去に対する有機物源として、下水污泥処理工程で発生する各種汚泥返流水について効果的な利用方策の検討を行った。得られた結果を以下に示す。

- (1) 流入下水、濃縮槽返流水及び脱水分離液の有機物分類を行った結果、全 COD に対する S_A 及び S_F の割合は、流入下水が約 5%であったのに対し、濃縮槽返流水が 3～19%、脱水分離液が 4.5 及び 33.0% であり、流入下水より高いことが確認された。
- (2) 消化槽分離液の有機物分類を行った結果、生物分解可能有機物が全く存在しなかった。キャリアガス除湿塔排水の全 COD に対する S_A 及び S_F の割合は 24.2%であったが、 NH_4-N 濃度が $220g-N/m^3$ と高濃度であった。冷却脱硫塔排水は、全 COD に対する S_I の割合が 50%以上であった。これらの返流水は、有機物源としての利用可能性が低いと判断された。
- (3) 窒素除去に対する必要有機物量の検討を行ったところ、単位流入下水量の処理に対して 10 箇所分の返流水を集めることで、文献値の必要有機物量を確保できることが示された。
- (4) 返流水の流入下水とは異なる性質より、2 段ステップ流入式硝化脱窒法において流入下水を前段無酸素槽へ、返流水を後段無酸素槽へ投入するプロセスが効果的であることがシミュレーションにより示された。
- (5) 汚泥集約処理により発生した返流水の利用を想定した場合、流入下水量 $1Q$ の処理プロセスに対して、処理下水量 $13Q$ 程度の下水処理により発生した汚泥処理返流水を有効利用可能であることがシミュレーションにより示された。

謝辞

本論文中の各返流水の測定に当たっては、本学大学院修士課程阿部順君、当時学生飯島良子さん、皆川文子さんの協力を得た。心より感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 鈴木穰(2001):水環境健全化のための高度処理技術とその課題。下水道協会誌, Vol.38, No.466, pp13-19.
- 2) 栗林宗人, 村上忠弘(1985): 汚泥処理プロセスよりの返流水の実態と処理性。下水道協会誌, Vol.22,

No.253, pp26-41

- 3) Henze,M.,Gujer,W.,Mino,M.,Matsuo,T.,Wentzel,M. and Marais,G.(1995):Activated Sludge Model No.2, *IAWQ Scientific and Technical Report No.3*.
- 4) Pederson,J. and Sinkjaer,O.(1992):Test of the activated sludge model's capabilities as a prognostic tool on a pilot scale wastewater treatment plant. *Wat.Sci.Tech.*,**25**(6),185-194
- 5) Funamizu,N. and Takakuwa,T.(1994):Simulation of the operating conditions of the municipal wastewater treatment plant at low temperatures using a model that includes the IAWPRC activated sludge model. *Wat.Sci.Tech.*,**30**(4),105-113.
- 6) Gujer,W. and Kappeler,J.(1992):Estimation of kinetic parameters of heterotrophic biomass under aerobic conditions and characterization of wastewater for activated sludge modeling. *Water Science and Technology*,**25**(6),125-139.
- 7) 船水尚行, 工藤亜佐子, 高桑哲男(1998): ステップ流入式多段硝化脱窒プロセスの段数効果に関する研究. 下水道協会誌, Vol.35, No.434, 119-130.
- 8) 国土交通省 都市・地域整備局 下水道部(2001): 既設処理場におけるグレードアップ手法に関する調査平成 12 年度.