

2槽式間欠曝気法による窒素・リン同時除去 —低濃度負荷時における処理特性について—

森 豊* 佐々木 康成*

山本 康次** 津村 和志*** 大地 佐智子****

* 富士電機総合研究所 水処理・バイオ研究所、神奈川県横須賀市長坂 2-2-1

** 大阪府立公衆衛生研究所 環境衛生課、大阪府大阪市東成区中道 1-3

*** 京都大学工学部 環境地球工学教室、京都府京都市左京区吉田本町

**** ユニチカ(株) 中央研究所、京都府宇治市宇治小桜 23

概要

2槽式間欠曝気法は、脱窒終了時に出現する ORP の屈曲点を制御指標として利用し、窒素、リンを同時に除去する嫌気好気活性汚泥法である。本研究では、原水流入濃度を一般的な下水の 2/3、1/2 まで低下させ、連続実験を行い各成分の処理特性について検討した。

各連続実験において、有機物および窒素除去については流入濃度低下の影響は見られなかったが、リン除去は不安定となった。目標水質である TP 1mg/L 以下を安定して達成するためには、原水 TOC で 100、BOD で 150mg/L 以上必要であった。また、第 1 反応槽の硝化（好気）時間と脱窒（無酸素）時間の比率を指標として、原水有機物濃度を推定し、リン除去状態を管理できることがわかった。

キーワード

窒素・リン同時除去、2槽式間欠曝気法、嫌気好気活性汚泥法

1. はじめに

2槽式間欠曝気法は、脱窒終了時に出現する ORP の屈曲点を制御指標として、各反応槽において曝気と攪拌を繰り返し行うことによって窒素、リンを同時に除去する嫌気好気活性汚泥法である¹⁾。本方式のような生物学的窒素、リン除去を行う場合、流入負荷変動に対する処理特性を把握することは重要であり、筆者らは水質や水量変動の影響等について検討を進めている²⁾。本報では、処理施設における初期運転や長期の降雨時等に想定される低濃度下水の流入が、有機物、窒素、リンの除去特性に与える影響について実験結果を報告する。さらに第 1 反応槽の硝化（好気）時間と脱窒（無酸素）時間比率（以下 DN 比と記す）を指標とした、原水有機物濃度の推定および、リン除去管理の可能性について考察を加えた。

2. 実験方法

(1) 実験装置

図-1 に実験装置のフローシートを示した。基本フローは、ほぼ同容積の第 1 反応槽 (76L) 及び第 2 反応槽 (74L) と最終沈殿池 (36L) からなり、各反応槽には独立運転が可能な攪拌機、曝気ブロウを設置してある。制御用センサとして各反応槽に DO、ORP 計を設置した。装置の

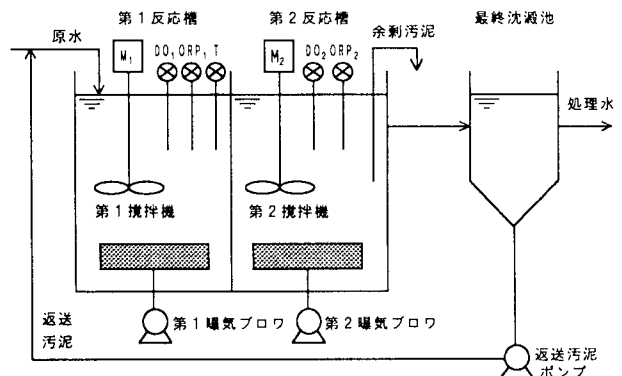


図-1 実験装置のフローシート

運転制御にはパソコンを中心とした制御装置を用いた。

(2) 制御方法

図-2 に制御運転時における 1 サイクル当りの ORP 変化と、窒素、リン除去に伴う生物反応を示した。各反応槽の運転は曝気および攪拌工程からなり、脱窒終了時点で出現する ORP の屈曲点を制御指標として、好気、無酸素、嫌気工程の区分と制御を行っている。

1) 第 1 反応槽の制御方法

第 1 反応槽は、嫌気時間を一定時間確保し 1 サイクル毎に確実にリン放出を進行させることが主な役割であり、残りの時間に硝化、リン吸収、脱窒を進行させる。

具体的な制御方法は、1 サイクルにおける屈曲点 P1 出現時間 T_{P1S} を設定し、実際の屈曲点出現時間 T_{P1} が T_{P1S} となるように、曝気時間 T_{N1} を (1) 式に従って調節する。

$$T_{N1n} = T_{N1n-1} + K_1 (T_{P1S} - T_{P1n-1}) \dots\dots (1)$$

ここで、

T_{N1n} : 次サイクルの曝気時間

T_{N1n-1} : 現サイクルの曝気時間

K_1 : 定数

T_{P1S} : 屈曲点 P1 出現時間の設定値

T_{P1n-1} : 現サイクルの屈曲点 P1 出現時間

である。また、好気時間とは図-2 に示すように、曝気時間 T_{N1} に、曝気停止後に DO が 0.5mg/L まで低下するのに要する時間である T_{D01} を加えた値である。本研究では攪拌を開始し DO が 0.5mg/L に低下した後、屈曲点 P1 が出現するまでの時間を無酸素時間としている。

このような制御を行うことにより、実際の屈曲点出現時間 T_{P1} が設定値 T_{P1S} より大きい場合は、次サイクルの曝気時間 T_{N1} が減少し、反対に T_{P1} が T_{P1S} より小さい場合には T_{N1} が増加する。その結果、屈曲点 P1 は常に設定値近傍に出現し、嫌気時間を設定値に維持することが可能となる。

2) 第 2 反応槽の制御方法

第 2 反応槽の役割は残った窒素、リンを確実に除去するとともに、1 サイクルを設定時間に維持することである。第 2 反応槽では好気時間に硝化およびリン吸収が、無酸素時間に脱窒と弱いリン吸収が進行している。1 サイクルの設定値は T_{P2S} で第 1 反応槽と同様の方法で曝気時間 T_{N2} の調節を行っている。屈曲点 P2 を検出すると、第 1、第 2 反応槽ともに 1 サイクルを終了し、次サイクルの曝気工程に移行する。

(3) DN 比について

DN 比は、第 1 反応槽における硝化 (好気) 時間と脱窒 (無酸素) 時間の比率であり、(2) 式で定義した。

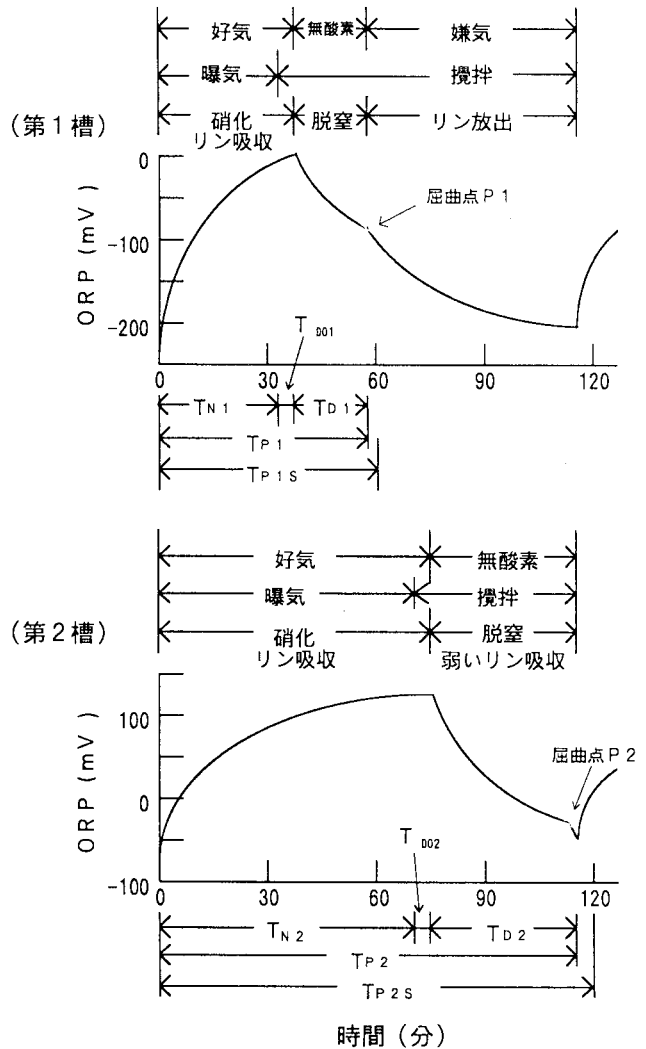


図-2 1 サイクル当りの ORP 変化と生物反応

$$r_{DN} = \frac{T_{D1}}{(T_{N1} + T_{D01})} \times 100 \dots\dots (2)$$

ここで、

r_{DN} : DN 比 (%) である。

硝化速度については、硝化が安定している場合、硝化速度はほぼ一定となる。一方、脱窒速度は流入有機物の影響を受け、流入濃度が高い場合には速く、低い場合は遅くなる。第1反応槽では、上述したように脱窒速度が増大し、脱窒時間が短くなった場合、次サイクルにおいて曝気(硝化)時間を増加させ、逆に脱窒速度が低下し脱窒時間が長くなった場合、曝気(硝化)時間を低下させる制御方法としている。このため、DN比は、流入有機物濃度が高い場合は減少、流入有機物濃度が低い場合は増加する関係となる。このDN比は、第1反応槽の屈曲点P1を検出することにより、制御装置内で自動的に計算することができる。

(3) 実験条件

表-1に実験条件を示した。上述の実験装置を1系列使用しRun I、IIの順に実験を行った。Run Iは水道水を用いて原水濃度を定常の2/3、Run IIでは1/2に希釈し、第1反応槽の攪拌時間のみに実験装置へ流入させた。実験は定常濃度負荷運転から濃度負荷を低下させた運転条件に移行する方法で行った。また滞留時間は各実験とも20時間、水温は20°Cに設定した。

実験に使用した原水はし尿、食堂排水、石鹼、合成洗剤、酢酸ナトリウム、砂糖、水道水を自動的に混合し調製した。また塩化アンモニウム、リン酸3ナトリウムを添加し、定常負荷運転では、原水中のTOC、T-N、T-P濃度をそれぞれ130、40、5mg/L程度に調節した。水質分析には1日1回のグラフサンプルを用いた。分析方法は原則として下水試験法に従ったが、亜硝酸性窒素、硝酸性窒素、アンモニア性窒素及び正リン酸性リンの分析はイオンクロマトグラフ法により行った。

3. 実験結果及び考察

(1) Run Iの連続実験結果

表-2に水質分析結果、図-3に連続制御実験結果を示した。

有機物除去について、低濃度負荷へ移行しRun I実験を開始した17日目以降、原水BOD 130.3mg/L、処理水BOD 1.9mg/L(除去率98.5%)、原水TOC 89.9、処理水

表-1 実験条件

項目	Run I	Run II
反応槽滞留時間 (時間)	20	20
水温 (°C)	20±1	20±1
1サイクル設定時間(分)	120	120
第1槽設定値		
曝気・脱窒時間(分)	60	60
第2槽設定値		
曝気時間(分)	60~85	55~85
DO設定値 (mg/L)	2.5	2.5
MLSS (mg/L)	3310	2820
SRT (日)	33.9	29.7
沈殿池滞留時間 (時間)	4.8	4.8
汚泥返送率 (%)	50	50、75
運転日数 (日)	53	43

表-2 水質分析結果

項目	Run I		Run II	
	原水	処理水	原水	処理水
pH (-)	7.3	7.2	7.0	7.1
BOD (mg/L)	130.3	1.9	97.7	3.4
D-BOD (mg/L)	23.1	-	40.7	-
TOC (mg/L)	89.9	7.0	54.7	5.1
D-TOC (mg/L)	27.0	-	22.9	-
SS (mg/L)	92.4	0.34	55.6	4.1
T-N (mg/L)	26.0	4.2	18.1	4.4
NH ₄ -N (mg/L)	19.7	1.3	13.4	0.35
NO _x -N (mg/L)	-	2.0	-	2.5
T-P (mg/L)	3.3	1.1	2.5	0.77
PO ₄ -P (mg/L)	-	0.52	-	0.39

7.0mg/L (除去率 92.2%) と良好であり、原水濃度低下の影響は見られなかった。窒素除去は、Run I 実験開始の17日目以降も、原水 T-N 26.0mg/L、処理水 4.2mg/L (除去率 83.8%) と目標水質である T-N 10mg/L 以下の良好な処理を達成していた。また原水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 19.7mg/L、処理水 1.3mg/L とアンモニアも良好に除去されていた。処理水 $\text{NO}_x\text{-N}$ は 2.0mg/L であった。リン除去については、実験開始直後より濃度低下の影響が見られ、原水 T-P 3.3mg/L、処理水 1.1mg/L (除去率 66.7%) と目標水質の 1mg/L 以下を安定して達成することは困難であった。これは有機物濃度の影響が顕著に現れたものと考えられる。また、実験期間の原水 D-BOD が 23.1mg/L と低かったことも影響したと考えられる。

(2) Run II の連続実験結果

表-2 に水質分析結果、図-4 に連続制御実験結果を示した。

有機物除去について、Run II 実験を開始した 28 日目以降、原水 BOD 97.7mg/L、処理水 3.4mg/L (除去率 96.5%)、原水 TOC 54.7mg/L、処理水 5.1mg/L (除去率 90.7%) と良好であり、Run I と同様、原水濃度低下の影響は見られなかった。窒素除去は実験開始以降、原水 T-N 18.1mg/L、処理水 4.4mg/L (除去率 75.7%) であり、10mg/L 以下の処理水質を達成していたが、実験開始後、処理水 $\text{NO}_x\text{-N}$ 濃度が増加する傾向を示した。 $\text{NH}_4\text{-N}$ は処理水 0.35mg/L と良好な除去を達成していた。リン除去については、Run I と同様に実験開始直後より影響が見られ、原水 T-P 2.5mg/L、処理水 0.77mg/L (除去率 69.2%) と平均値は

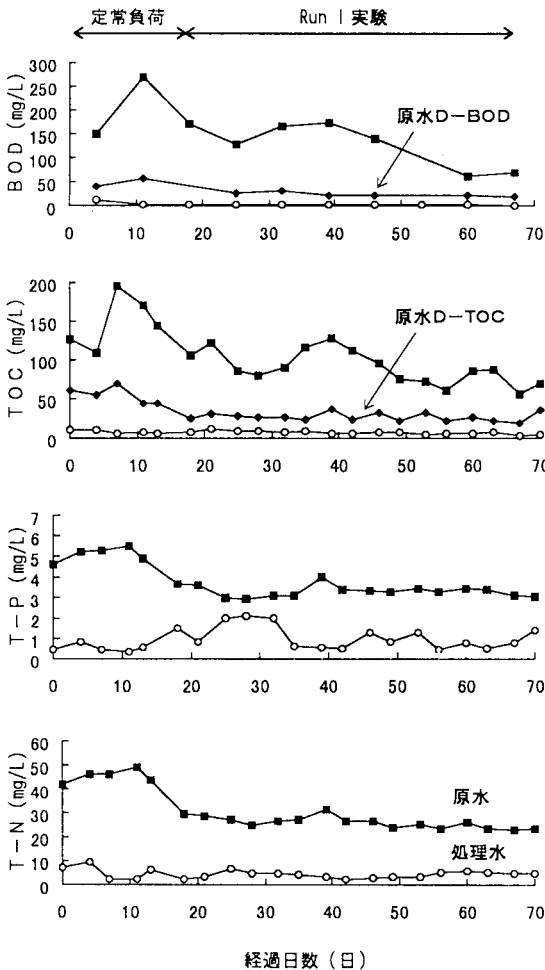


図-3 Run I の連続実験結果

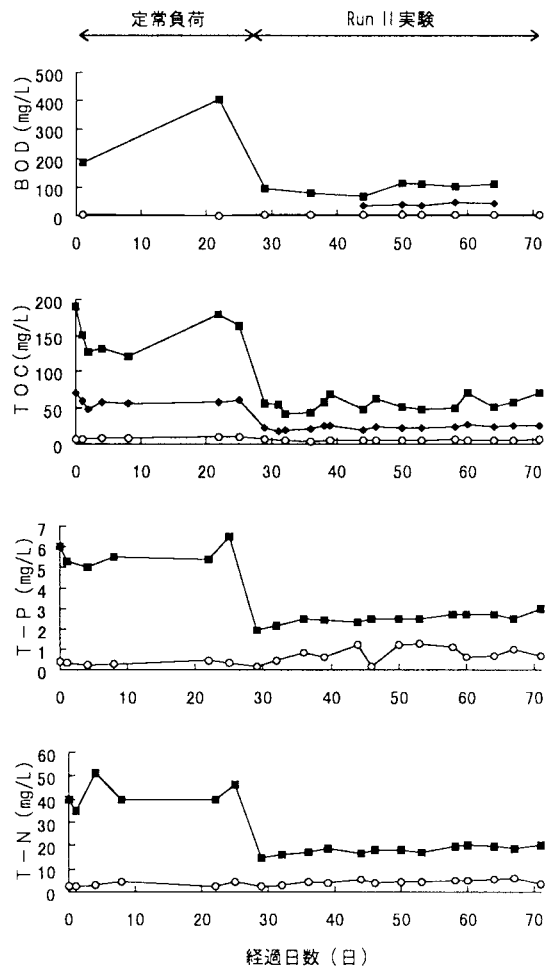


図-4 Run II の連続実験結果

目標処理水質の T-P 1mg/L 以下であるが、1mg/L を超えるデータも見られ、安定して目標以下の処理を達成することは困難であった。

(3) 流入有機物濃度とリン除去について

図-5 に Run I、II における第 1 反応槽の曝気終了時とサイクル終了時の PO₄-P 濃度差(リン放出による濃度変化)の経日変化を示す。Run I においては顕著な傾向は示していないが、PO₄-P の濃度差が 1~2mg/L 程度と低いサイクルが出現した。Run II においては実験開始直後より、リン放出の低下が顕著に見られ、実験開始後の PO₄-P の濃度差は平均 1.3mg/L と、定常状態での平均濃度差 9.8mg/L の約 1/7 となっていた。このように、リン放出が少ない状態を実験期間中継続しており、リン除去が不安定になったと考えられる。

図-6 に定常濃度負荷と Run I、II の実験期間における原水 TOC 濃度と処理水 T-P 濃度の関係を示す。原水 TOC 濃度が低い領域では、リン除去は不安定であり、目標である T-P 1mg/L 以下を確実に達成するためには、本実験では原水 TOC で 100mg/L 以上必要であった。また、同様に解析した結果、原水 BOD では 150mg/L 以上必要であった。

原水有機物濃度が低い場合の対策としては、本実験のように窒素除去に余裕がある場合、第 1 反応槽の嫌気時間を増加させることにより、リン放出のためにより多くの有機物を供給し、リン除去を安定させる方法がある。本法は制御方式でも述べたように、屈曲点 P1 出現時間の設定値 T_{P1S} を減少させることで、容易に嫌気時間を増加させることが可能である。また、このような対策を実施することによって、前述の TOC、BOD の原水の下限値を低下させることが可能であると考えている。

(4) DN 比と原水有機物濃度の関係について

図-7 に Run I、II における DN 比と原水 TOC の経日変化を示す。Run I においては、有機物濃度の増減に伴い、DN 比の変動が見られた。Run II においては実験開始後より TOC 濃度低下とともに、DN 比増加が顕著に見られた。次に、図-8 に原水 TOC 濃度と DN 比の関係を示す。若干ばらつきはあるが、原水 TOC 濃度の低下に伴い、DN 比が増加する傾向を示しており、DN 比から原水有機物濃度の増減傾向を把握することが可能であると考えられる。一方、図-8 中の楕円内のデータ A、B は原水有機物濃度が大きく変動した時及びその直後に得られたもので、A は Run I の定常負荷条

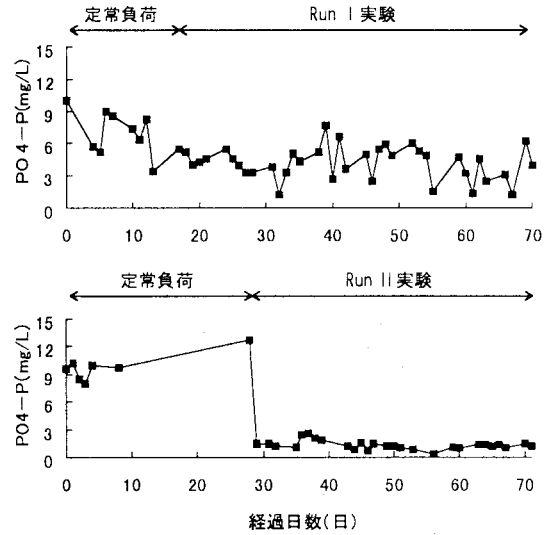


図-5 第 1 反応槽における曝気終了時とサイクル終了時の PO₄-P の濃度差

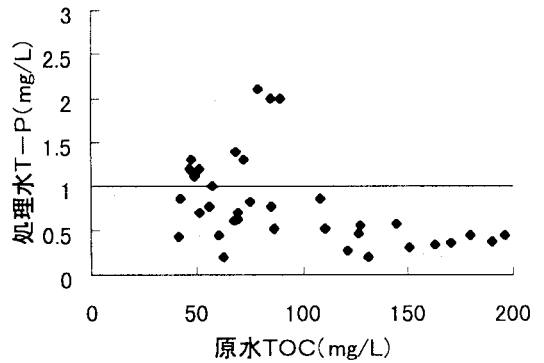


図-6 原水有機物濃度と処理水 T-P の関係

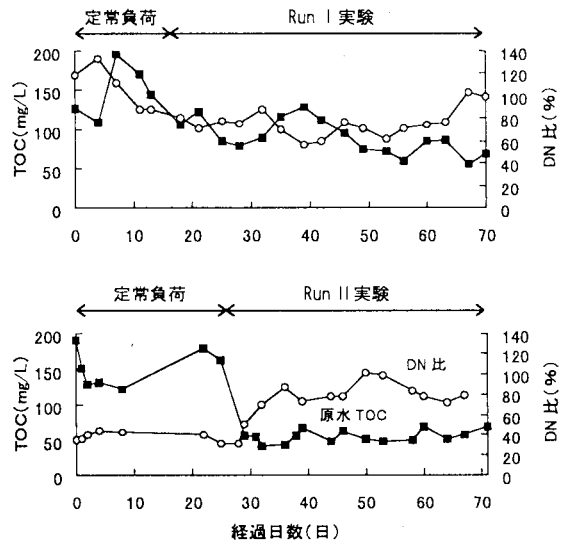


図-7 DN 比と原水 TOC の経日変化

件の期間、BはRun II実験の開始直後のデータである。このように、DN比のばらつきが大きくなっており、原水有機物濃度の短期的な変動をDN比で追従することは難しい。また、過去に行ったDN比検討の報告³⁾においても同様の傾向であった。

(5) DN比とリン除去の関係について

図-9に第1反応槽の曝気終了時とサイクル終了時の PO_4-P 濃度差と処理水T-Pの関係を示す。リン放出が弱く、 PO_4-P 濃度差が小さい場合、リン除去が不安定となっており、目標であるT-P 1mg/L以下の処理水質を達成するためには、第1反応槽内における PO_4-P 濃度差が6mg/L以上必要であった。次に、図-10に PO_4-P 濃度差とDN比の関係を示す。なお、図-8の楕円内A、Bの期間のデータは除いている。DN比の減少に伴い、 PO_4-P 濃度差が大きくなる傾向を示しており、DN比から第1反応槽内の PO_4-P 濃度差すなわち、リン放出の状態が把握できると考えられる。本実験では、DN比が60%以下であれば、T-P 1mg/L以下の処理水質を達成するのに必要なリン放出が確保されていると判断できる。

4. まとめ

原水流入濃度を一般的な下水の2/3、1/2まで低下させ、連続実験を行い以下の結果を得た。

- ①有機物除去については、流入濃度低下の影響は見られなかった。窒素除去は、目標のT-N 10mg/L以下の処理水質を達成可能である。リン除去は、安定して1mg/L以下を達成することは困難であった。
- ②安定して目標であるT-P 1mg/L以下の処理水質を達成するためには、原水TOC 100、原水BOD 150mg/L以上必要であった。リン除去安定化のための対策として、嫌気時間を増加させた運転を行うことにより、原水に要求される有機物濃度下限値を低下させる方法がある。
- ③短期的な変動を除き、DN比(脱窒時間/硝化時間)から原水有機物濃度の増減傾向を推定することが可能である。また、第1反応槽のリン放出状態を推定することが可能である。

【参考文献】

- 1) 佐々木ら、「窒素・リン同時除去を目的とした2槽式間欠曝気活性汚泥法の原理と処理性能について」下水道協会誌, Vol.32, No.385, P49~58 (1995)
- 2) 森ら、「2槽式間欠曝気法による窒素・リン同時除去-負荷変動対策について-」第33回下水道研究発表会講演集 P501~503 (1996)
- 3) 森ら、「2槽式間欠曝気法における脱リンの管理指標について」第27回日本水環境学会年會講演集 P174~175 (1993)

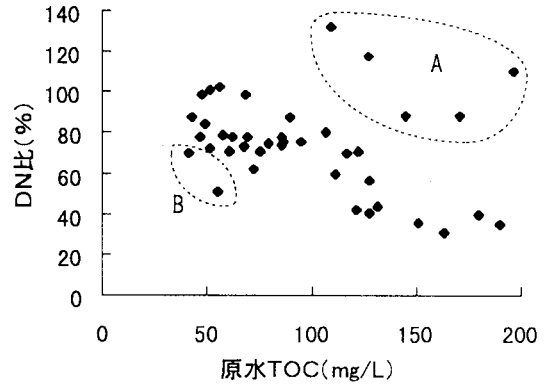


図-8 原水TOCとDN比の関係

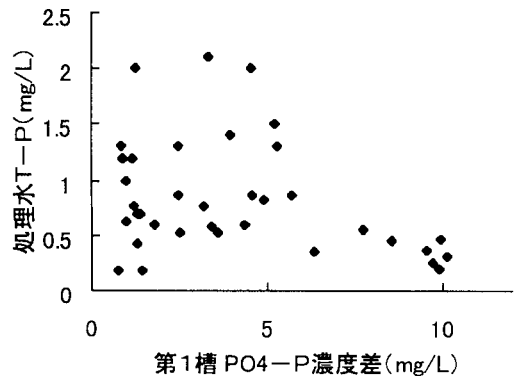


図-9 第1槽 PO_4-P 濃度差と処理水T-Pの関係

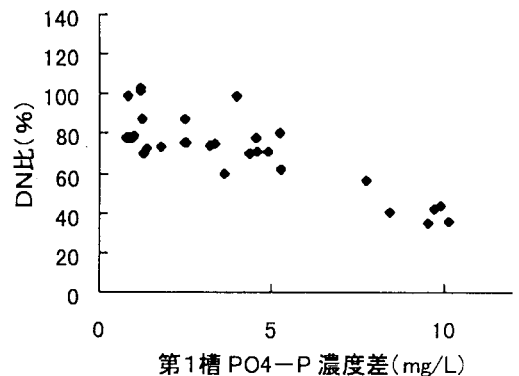


図-10 第1槽 PO_4-P 濃度差とDN比の関係