

# 下水の窒素除去率に与える処理水循環の影響

— 数値シミュレーションによる検討 —

羽 田 守 夫

## The effect of circulation on Nitrogen purification efficiency in sewage treatment process by means of numerical simulation method

Morio HANEDA

(1994年 8 月22日受理)

Recently, an-aerobic and aerobic process is used to increase purification efficiency of N and P in sewage treatment. Circulation of treated sewage to an-aerobic tank is operating in this process, so that high purification efficiency can be obtained.

In this paper, the effect of circulation on N reduction is considered by means of numerical simulation method. As a result of consideration, the following conclusions were obtained. 1) circulation is effective to increase the efficiency and the effect depends on the basic purification efficiency  $S_0$ . 2) The most suitable value of circulation ratio  $r$  is considered to be about 2.0. 3) To reach the purification efficiency of N more than 80%,  $S_0$  value is necessary to be more than 0.4.

### 1. はじめに

近年の下水処理上の課題は、BODに示される炭素系有機物の処理から、窒素やリンなどの富栄養化関連物質の効率的な処理に移って来ている。この目的のため開発された処理法が嫌気・好気法で、嫌気状態と好気状態とを繰り返すことにより脱窒素及び脱リンを行わせようとするものである。

水域の富栄養化の進行を見ると、窒素よりもリン制限の水域の方が多いが、凝集沈澱によって比較的除去し易いリンよりも、窒素の除去の方が難しく、それ故窒素過多の水域が増加して来ている。

窒素の基本的な除去法は、硝化と脱窒の組み合わせによる生物学的窒素除去であり、前者には好気性の硝化菌が、後者には嫌気性の脱窒菌がそれぞれ触媒的な働きで作用し、最終的に窒素ガスとして大気中に放出される。この処理法の鍵は硝化の進行と脱窒の過程のふたつにあり、好気性と嫌気性という相反する相を連続させなければならないことである。このため好気性の曝気槽を通過した処理水を嫌気槽に循環させることにより処理効率の向上を図ること

が行われている。

しかし、この操作には様々な因子が影響を与え、どの程度循環を行えば良いかが明確ではない。そこで本稿では、除去システムの簡単なモデル化を行いこの数値シミュレーションによってどの因子が除去効率にどのように影響するかを検討し、最適な循環比を求める際の参考となるよう努めた。その結果、二、三の知見が得られたのでここに報告する。

### 2. 窒素除去のモデル

図一1に、嫌気槽、好気槽及び沈澱槽の三槽からなる連続式下水除去の基本的プロセスを示した。

この時、基礎除去率  $S_0$  は次の式で与えられる。

$$S_0 = \frac{(C_{10} - C_0)Q}{C_{10}Q} = \frac{C_{10} - C_0}{C_{10}} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $C_{10}$ ：流入濃度、 $C_0$ ：流出濃度、 $Q$ ：流入量

(1)式を変形すると

$$C_0 = C_{10}(1 - S_0) \dots \dots \dots (2)$$

また、この時の滞留時間は  $V$  を全体の体積として

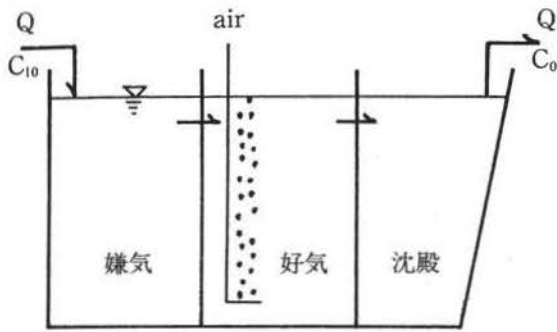


図-1 基本的な除去プロセス

$$T_0 = V/Q \quad \dots\dots\dots(3)$$

以上が基本的な処理プロセスである。

次に、図-2に嫌気・好気循環法のプロセスを示した。図-1との違いは濃度  $C_1$  の処理水が  $Q \cdot r$  だけ嫌気槽に返送循環されることで、この時の流入濃度  $C_1$  は次のようになる。

$$C_1 = \frac{QC_{10} + QrC_1}{Q + Qr} = \frac{C_{10} + rC_1}{1+r} \quad \dots\dots\dots(4)$$

この場合も、流入水は基本的に同じ機構で浄化されるとすると、(2)式と同様に

$$C_1 = C_1(1 - S_0) = C_{10} \frac{1 - S_0}{1 + rS_0} \quad \dots\dots\dots(5)$$

また滞留時間  $T$  は、滞留時間比を  $t$  とすると

$$T = \frac{V}{Q(1+r)} = T_0 \cdot t \quad \dots\dots\dots(6)$$

このプロセスの除去率  $S$  は、(1), (5)式より

$$S = \frac{(C_{10} - C_1)Q}{C_{10}Q} = \frac{1+r}{1+rS_0} S_0$$

$$= \frac{1+r}{(1/S_0 + r)} \quad \dots\dots\dots(7)$$

ただし、 $0 < S_0 \leq 1$

すなわち、除去率は循環比  $r$  と基礎除去率  $S_0$  に支配されて変化することを示している。

これが成立するのは、 $r$  の増加によって滞留時間や流入濃度が変化しても、除去プロセスには影響を与えない場合に限られる。しかし一般的に、この変化は除去プロセスに影響を与え、異なった様相を示すと考えられる。そこで次にこの影響を検討する。

ここでは二つのケースについて検討する。一つは(7)式の  $S_0$  にたいする影響を線形で与える場合で、 $S_0$  の代わりに  $S_L$  とし、次の式で与える。

$$S_L = (1+ar)S_0 \quad \dots\dots\dots(8)$$

ただし、 $-0.25 \leq a \leq 0.60$

もう一つのケースが、影響を非線形とし非線形関数を与えて  $S_0$  を  $S_n$  で表すものである。

$$S_n = S_1 + S_2 \leq 1.0 \quad \dots\dots\dots(9)$$

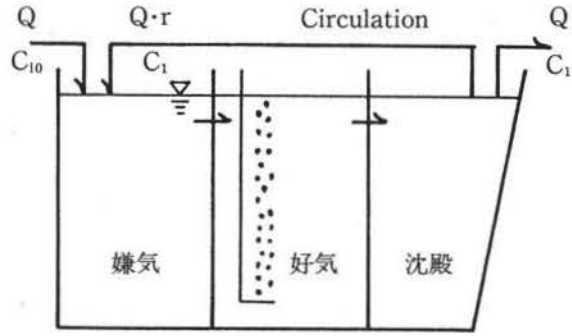


図-2 循環を伴う除去プロセス

かつ、(9)式のように全体の除去を好気性槽と嫌気性槽の除去  $S_1$  と  $S_2$  に分け、それぞれについて次のような関数を与えた。

$$S_1 = S_0 \frac{\exp(b(1-r/r_0))}{1 + \exp(b(1-r/r_0))} \quad \dots\dots\dots(10)$$

ここに、 $r_0$ ；除去率が1/2になる循環比、 $b$ ；係数

$$S_2 = S_0(1 - S_0) \frac{\exp(\sqrt{r/r_s}) - 1}{e - 1} \quad \dots\dots\dots(11)$$

ただし、 $0 \leq r \leq r_s$

$$S_2 = S_0(1 - S_0) \frac{\exp(b(1 - (r-r_s)/r_0))}{1 + \exp(b(1 - (r-r_s)/r_0))} \quad \dots\dots\dots(12)$$

ただし、 $r_s < r$

ここに、 $r_s$ ；嫌気槽の除去率が最大となる循環比、 $b$ ；係数

この(10)~(12)式の関係をも、模式的に図-3に示した。 $S_1$  は、 $r$  の増加と共に徐々に減少し、 $r_0$  で変曲点を迎えた後ゆっくり0に近づくように、 $S_2$  は、 $r$  と共に急激にその最大値に近づく、その後は  $S_1$  と同様に変化するようにしてある。(12)式には基本的に(10)式と同じ関数を与えてある。

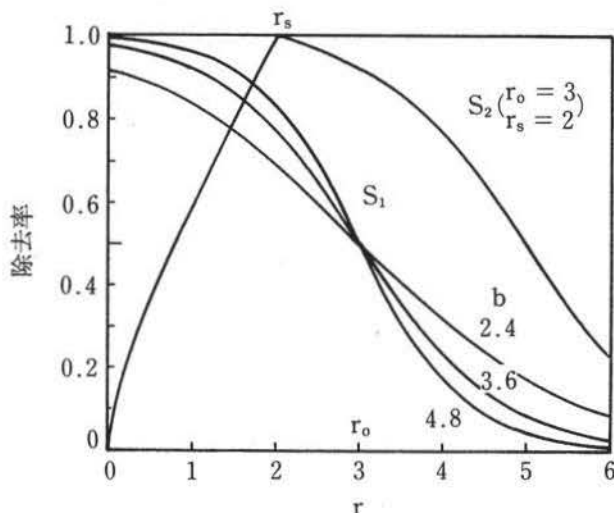


図-3 非線形関数  $S_1$ ,  $S_2$  のプロフィール



### 3. 結果と考察

#### 3・1 除去プロセスに影響がない場合

循環比  $r$  の増加に伴う除去率  $S$  の変化を、基礎除去率  $S_0$  をパラメーターとして図-4に示した。これによると、除去率  $S$  は、 $r$  の増加と共に基本的に増大し、その割合は  $r$  が小さい時程大きいこと、及び  $S$  の増大する割合は、基礎除去率  $S_0$  が小さいほど大きく、 $S_0$  が大きいと余り増加は期待できないことが認められる。これから分かることは、 $r$  を極端に大きくすることは意味がなく、どこかに最適値が存在する可能性があること、及び  $S_0$  は小さい程  $r$  の効果が大きい、ある一定値以上の除去率を期待したければ  $S_0$  の方も基本的にある値以上でなければならないことである。例えば、80%以上の除去をするためには、この  $r$  の範囲では少なくとも  $S_0$  は0.4以上でなければならないことになる。

$r$  の増加によって  $S$  は増大し続けるということは現実には有り得ないことではあるが、この検討から  $r$  の増加による基本的な  $S$  の変化の傾向の把握はできるし、また槽の容量を増大させて滞留時間等の影響を少なくすればこのような除去率増大の傾向を保持することも可能と考えられる。

#### 3・2 影響を線形関数で与えた場合

循環に伴う滞留時間や流入濃度の減少は、除去プロセスにマイナスの効果を与えられし、一方新たな嫌気槽の役割は同じくプラスの効果を与えられし。これらの効果の表れ方を明確に表現することは困難なので、ここではまずトータル

に、線形的に除去プロセスに影響すると考えて式(8)を与え、この中の係数  $a$  をマイナス側では-0.25から5%刻みに、プラス側では10%刻みに0.6までそれぞれ変化させて除去率  $S$  への影響を検討した。この結果を  $S_0$  が0.4のケースについて図-5に示した。

これによると、 $a$  がマイナス側で初めて除去率  $S$  に減少がみられ、 $r$  に最適値が存在すること、及びマイナスの絶対値が増加するにつれてその最適値が  $r$  の小さな段階で生じることが認められる。しかし、マイナスの影響のみでは当然のことながら除去率の大きな増加は期待できず、80%以上といった高度の除去の達成には循環によるプラスの効果の期待しない訳にはゆかない。それがプラス60%までの曲線に表されており、特に  $r$  の小さな段階での急激なプラス効果の増加が高度の除去には必要であることが認められる。

下水処理の基本的プロセスにおける窒素の除去率は、一般的に40~60%程度であり、循環を伴う場合80%以上にも達すると言われる。循環の除去プロセスへの影響を線形と考えた場合、高度除去を達成するには以上の考察から初期の大きなプラス効果の存在が必須と考えられ、これは具体的には嫌気槽による脱窒の向上によるものと思われる。そして徐々にマイナスの効果が効いてくるものと思われる。

そこで、 $a$  の値を循環比1.5までは+25%、その後  $r$  の0.5増毎に-5%づつ減じ最後は-10%まで変化させたときの除去率  $S$  の変化を、 $S_0 = 0.3 \sim 0.5$  の3ケースについて図-6に示した。これは、図-5の各曲線を各  $r$  の時点で移行した曲線を示し、これによると最適  $r$  の存在、高度除去のために必要と

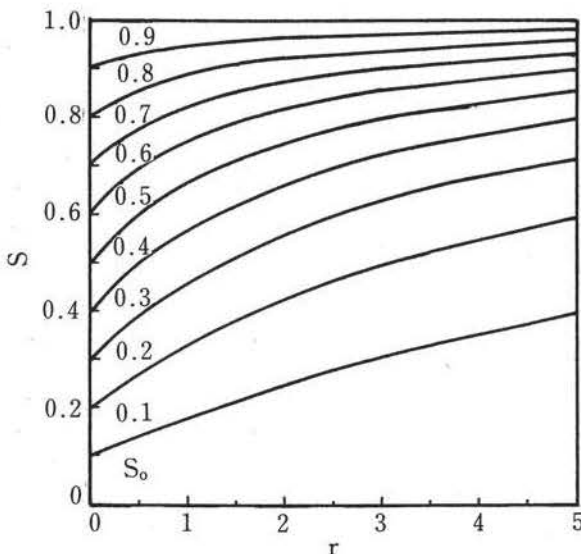


図-4 循環に伴う除去率の変化

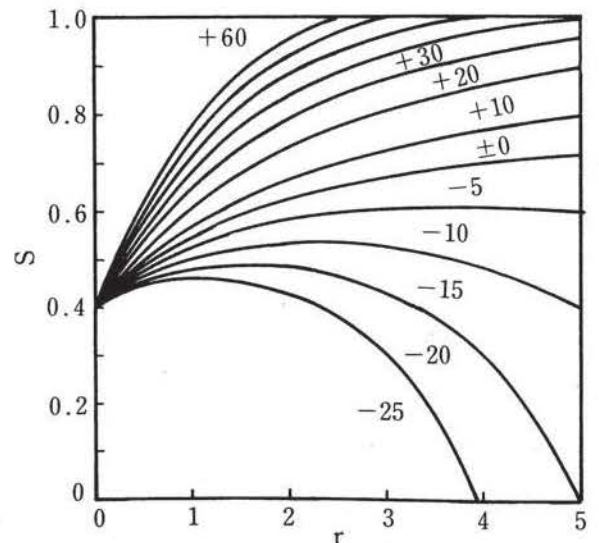


図-5 除去率に与える a の影響

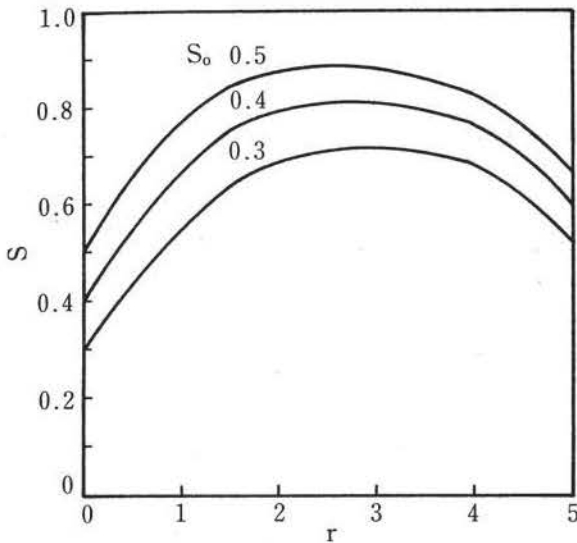


図-6 除去率に与える  $S_0$  の影響

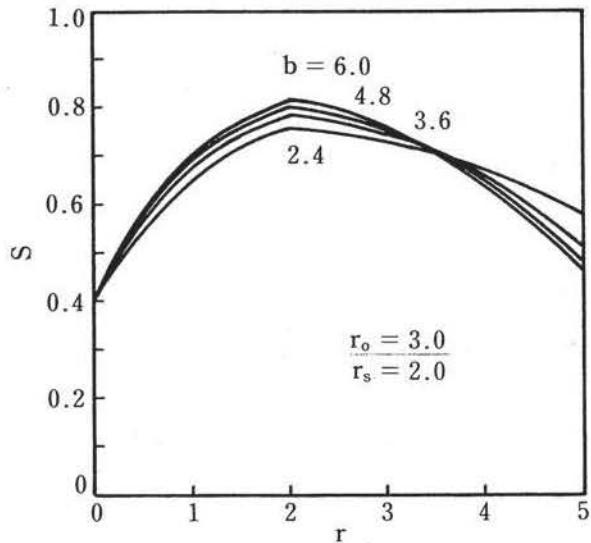


図-7 除去率に与える  $b$  の影響

される  $S_0$  の限界値等の傾向が示されている。 $a$  値が常に一定ということは考えられないので、実際にはこの曲線に示されるような現象が表れているのではないかと考えられる。

### 3・3 影響を分離して非線形関数で与えた場合

これまでの考察から明らかなように、除去率の向上には嫌気槽における初期の大幅なプラス効果が必要である。そこで、式(9)に示したように、好気性槽の除去率  $S_1$  と嫌気性槽の除去率  $S_2$  に分割して現実に合わせて検討することにする。 $S_1$  は  $r$  の増加と共に基本的に減少する関数とし、逆  $S$  字関数として式(10)を、 $S_2$  は初め増大してピークに達した後は減少に転じるものとして、式(11)と式(12)の二つの関数をそれぞれ与えた。また、 $S_2$  は  $S_1$  の影響を受ける関数でもあり、かつ合計1.0以下でなければならないので  $S_2$  の最大値を  $S_0(1-S_0)$  とした。

シミュレーションによる変数は、係数  $b$ 、除去率が0.5に減じる時の循環比  $r_0$  及び嫌気槽の除去率が最大に達する時の循環比  $r_s$  の三つである。

まず初めに、除去率  $S$  に与える係数  $b$  の影響について検討した。図-7に、 $r_0 = 3.0$ 、 $r_s = 2.0$  に固定した時、係数  $b$  を2.4~6.0まで1.2刻みに変化させた時の  $S$  の変化を示した。元来係数  $b$  の値は、除去率が  $r$  の増加によってどのように減少するかを表し、 $b$  が小さければ初期の減少は大きい但其後はゆっくりと減じる傾向を、大きければ初期の減少は小さいがその後急激に減じる傾向をそれぞれ示す。

係数  $b_2$  には不連続関数を与えているので、図-7の曲線にもこの傾向が見られるが、図は基本的に前

述の傾向を示しており、係数  $b$  が大きいほど初期の除去率の増大が大きく、その後の減少もまた大きいことが読み取れる。即ち、 $b$  の増減は除去率の増減とそのピーク期間の持続の長さの双方に影響を与えているが、その影響の表れ方はこの図からはあまり大きくはなく、全体としてそう大きな影響は持っていないことを読み取ることが出来る。

次に、係数  $b$  を3.6、 $r_s$  を2.0に固定し、係数  $r_0$  を2~5まで1.0刻みに変化させた時の  $S$  の変化を、 $S_0$  が0.4のケースについて図-8に示した。これによると、 $r_0$  が小さいと  $r$  の初期の段階で除去率がピークに達し、このピークも小さくまたその後も急激に除去率が減じること、大きくなると除去率も増大し、ピークに達する時間が遅くなりまたピークが長

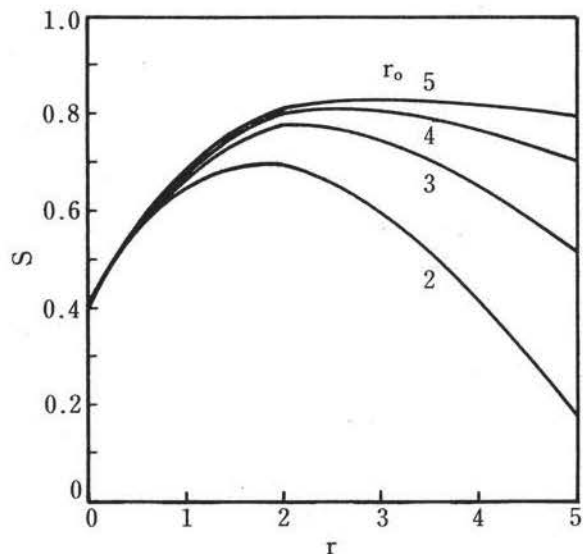


図-8 除去率に与える  $r_0$  の影響



く続く傾向のあることが認められる。 $r_0$ は、除去率が0.5になる時の除去率の減少率の変曲点を示し、これが大きいと除去プロセスに与える循環のマイナス効果が小さいことを、小さいとマイナス効果が大きいことをそれぞれ表している。

この結果は、 $S$ の増減やピークの持続時間に与える $r_0$ の影響の大きさを明瞭に表していると考えられる。特に $S$ の増減に対する影響が大きく、 $r_0$ に関しては3~4が妥当な値ではないかと考えられる。このことは、好気槽の滞留時間が25~20%に減じて初めて除去率が50%に減少することを意味し、好気槽の除去プロセスに対する循環のマイナス効果がそれ程でもなく、プロセスの余裕がかなり大きいことを示している。

図-9には、 $b$ を3.6、 $r_0$ を3.0に固定し $r_s$ を1~4に1.0刻みに変化させた時の $S$ の変化を、 $S_0$ が0.4のケースについて示した。これによると、 $r_s$ が小さいと除去率は早い段階でピークに達して比較的早く減じ始めること、大きいとピークに到達する時間は遅くなるがその継続時間が長くなり、かつピーク値そのものは小さくなるという傾向のあることが読み取れる。つまり、 $S$ を最大にする $r_s$ の最適値が、 $S_0$ によって変化はするものの存在すると思われることと、 $r_s$ が $S$ のピークのずれに大きく関わっていると思われることである。

$r_s$ は、嫌気槽の機能が最大限に発揮される時の循環比を表すが、これが小さければ早めに除去率のピークに達し、その後の変化は $r_0$ 値に影響されることを示している。この図は、高度の除去を達成するには $r_s$ が大きくなり過ぎてはならないことを示して

おり、 $r_s$ の最適値は比較的小さい段階で生じるものと考えられる。この図からは2前後以内の値が妥当な値と読みとることが出来よう。

このように、 $r_s$ 値は最適な $r$ 値の決定に大きな影響を持っており、嫌気槽の機能をより詳細に検討することが重要である。

以上、三変数の検討から、特に $r_0$ と $r_s$ の除去率に与える影響の大きさが認められた。そこで次に、係数 $b$ は一定とし、 $S_0$ の大きさによってどのように除去率が影響を受けるかを検討した。ここでは、 $r_0$ と $r_s$ をそれぞれ4と2にしたケースを図-10に、両方とも3にしたケースを図-11に、 $S_0$ を0.3~0.6の4段階に変化させてそれぞれ示した。

これらによると、基礎除去率 $S_0$ が小さいときは除

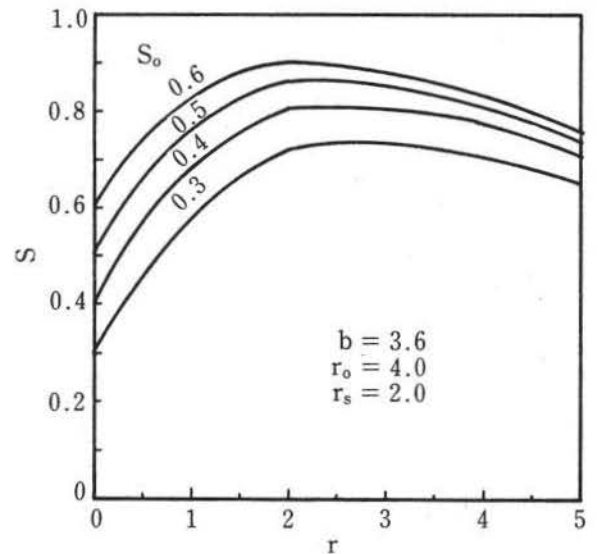


図-10 除去率に与える基礎除去率の影響

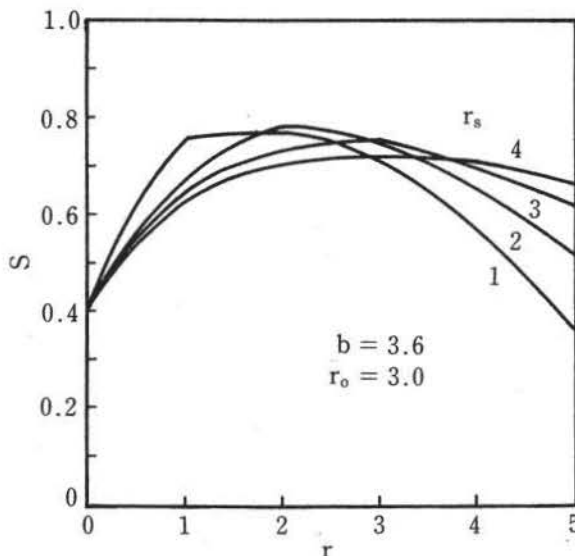


図-9 除去率に与える $r_s$ の影響

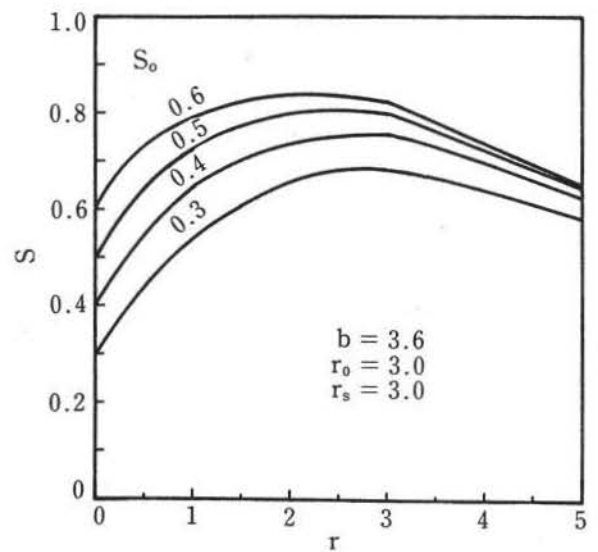


図-11 除去率に与える基礎除去率の影響

去率  $S$  が最大に達する最適循環比  $r$  は比較的大きいが、 $S_0$  が大きくなるに従って  $r$  の小さな段階で最大に達する傾向があること、除去率80%以上と言った高度除去の達成には  $S_0$  にも要求される最低限の値が存在し、これは約0.4以上と考えられること及びこれらの傾向には  $r_0$  や  $r_s$  値が影響を与えているが、 $r_0$  が大きく  $r_s$  の小さい図-10の方がより適切に実際の現象を現している可能性が大きいと考えられること等が認められる。とすれば、最適  $r$  値は4、5と言った大きな値ではなく、せいぜい2～3程度で達成されるのではないかと考えられる。これに経済性も考慮すればもう少し早い段階、すなわち2前後の値が最適値となり得ると結論することが出来よう。

#### 4. おわりに

下水処理における窒素除去率に与える処理水循環の影響について、数値シミュレーションを用いて基礎的な検討を行った。好気及び嫌気槽の除去メカニズムについてはまだまだブラックボックスに近いが、数値シミュレーションを用いることによって大まかではあるが基本的な傾向を把握することが出来た。

得られた結論をまとめると次の通りである。

(1) 処理水の循環は、基本的に除去率向上に良い影響を与える。

(2) 影響の程度は、基礎除去率が小さいほど大きく、循環比が小さいほど向上の割合が大きい。

(3) 高度の除去を達成するには、基礎除去率も一定値以上なければならない。

(4) 除去率への影響をプラスに維持するには、槽を大きくするなどの対策も必要である。

(5) 循環比を大きく取りすぎるとマイナスの影響もでてくるので、循環比には最適値が存在する。

(6) この最適値には、循環の好気槽への影響 ( $r_0$  値) 及び嫌気槽への影響 ( $r_s$  値) の両者の度合いが関わっている。

(7) 窒素除去率からみると、 $r_0$  は3～4、 $r_s$  は2前後が最適と考えられる。また、高度除去のためには  $S_0$  は0.4以上でなければならない。

(8) 最適循環比  $r$  は2～3が適当で、かつ2前後の値が最適と推定される。

#### 参考文献

- 1) 安田 正他, 循環式嫌気好気ろ床法における硝化脱窒に対する処理水循環の影響, 土木学会第48回年次学術講演会講演概要集, pp. 1274～1275, 1993
- 2) 須藤隆一, 合併処理浄化槽による窒素除去, 建設工学研究振興会年報, Vol. 28, pp. 39～48, 1993