

(2) 窒素起因BODの制御を考慮した下水処理施設計画に関する一考察

A STUDY ON PLANNING AND DESIGN OF WASTEWATER TREATMENT PLANT CONSIDERING CONTROL OF N-BOD

堤 武*・酒井 彰*・平林正守*

Takeshi TUTUMI*, Akira SAKAI*, Masamori HIRABAYASHI*

Abstract; In planning and design of a wastewater treatment plant, it is important to understand the biological reactions that affect the quality of plant effluent and to set up water quality goal. There exists a problem concerning the BOD analysis when $\text{NH}_4\text{-N}$ is nitrified in a wastewater treatment process. In the case when $\text{NH}_4\text{-N}$ coexists with nitrifying bacteria in the effluent, the oxygen demand for the nitrification (N-BOD) increases.

This paper presents some examples indicating that the nitrification in an organic oxidizing process affects the BOD values in the effluent and proposes a plant design procedure controlling nitrification and maintaining low N-BOD value, although some quantitative considerations are still needed. Water quality goal of a wastewater treatment is affected by river conditions and water quality criteria, therefore, such treatment plant design parameters as capacity and BOD loading of plant facilities should be determined taking these factors into account. Keeping the difference of nitrogen composition in the effluent in view, the behavior of $\text{NH}_4\text{-N}$ in a river is studied and treatment plant design parameters are evaluated for the case that $\text{NH}_4\text{-N}$ concentration in the effluent affects the use of river water.

Keywords; Planning and design, wastewater treatment plants, nitrification, water quality index, water quality evaluation.

1. はじめに

下水道整備は、公共用水域の水質保全に資することを重要な目的として推進されている。放流水域が河川の場合、河川水域の有機性汚濁を表わす指標として、BODの有効性が認められており、考慮される水質指標は、BODが中心になっている。このため下水道整備計画における水質保全の目標は、BOD環境基準を満足することにより達成されるという考え方が支配的である。また下水処理施設計画においてもBODは、設計・運転管理のための指標として活用されている。

このBODとは、水中の有機物濃度を表す指標とされているものであるが、下水処理施設において窒素成分が酸化されて硝酸態窒素が生じる現象がみられる場合には、BOD測定におけるフランビン中での硝化菌によるアンモニア性窒素($\text{NH}_4^+\text{-N}$)等の酸化による酸素の消費が測定値に含まれることになる。(この窒素起因のBODを以下N-BODと称する。)

従来の処理場施設計画においては、BODを処理プロセスと水域における水質の状態を一貫して表す指標として扱っていながら、上記のような現象を十分に考慮していたとは言えなかった。この理由としては、①処理過程における硝化反応と、それによるN-BODの定量的把握が十分行われていなかったこと、②処理水BODの組成、すなわちN-BODと有機物起因のBOD(以下C-BOD)の割合、窒素の形態といった処理水質特性と放流水域での水質挙動の関係が把握されていないことが指摘できよう。

本報では、2、3で下水の処理過程において、硝化反応が進行している現象を考慮した施設計画の考え方

* 株式会社日水コン下水道事業部 Nihon Suido Consultants Co., Ltd. Sewerage Department

Fig-1 に本報で考察する内容及びそのフローを示し、合わせて検討対象とした水質指標を明らかにした。河川水質の検討対象水質項目として、 NH_4^+-N をとりあげたのは、水処理過程での窒素成分の硝化に注目した複数の施設計画案を考えたときに、放流水質特性において最も顕著な差異を示すためである。ここでは、施設の負荷条件と公共用水域への NH_4^+-N のインパクトの関係によって、処理プロセスと公共用水域のリンケージを図った。

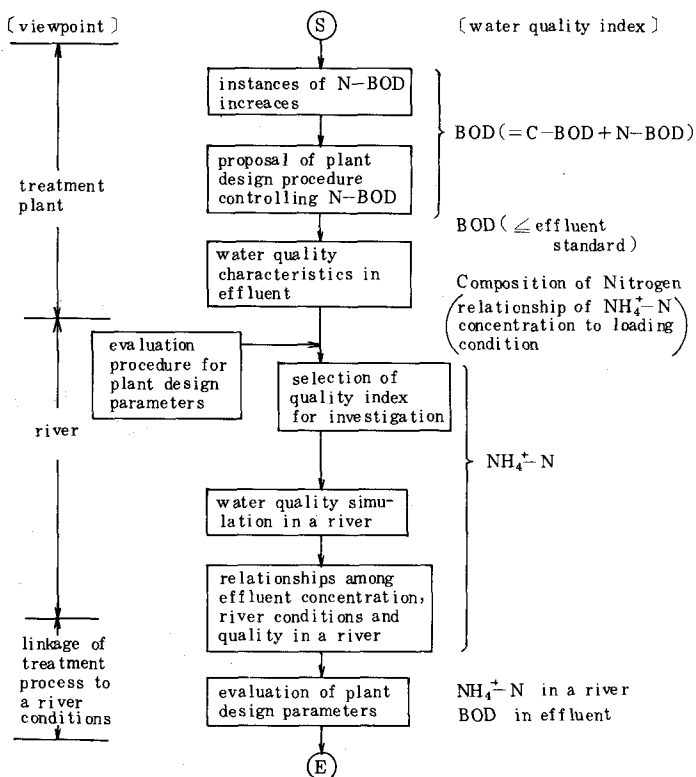


Fig.—1 Flow chart in consideration

2. 処理水BODの特性について

2.1 処理プロセスにおける窒素の挙動とN-BOD

処理水の N-BOD 値に影響する因子は、フランビン中の硝化菌菌体量と窒素基質（大部分は NH_4^+-N ）量である。N-BOD の値は、処理プロセスにおける硝化の状況を反映したフランビン中での窒素の挙動により説明される。

- 1) 硝化が進行した場合には、菌体量は豊富に存在するが、残存している窒素基質量が少いため、N-BODの値は小さい。
- 2) 硝化反応は起きているが残存 NH_4^+-N がかなり存在する場合には、菌体量もある程度存在するため、フランビン中での硝化量は大きくなり、N-BODの値は最大になる。
- 3) 硝化反応が抑制されている場合には、菌体がほとんど存在しないため、 NH_4^+-N は存在するが、N-BOD値は小さい。

N-BOD値は、窒素基質量が同一であっても、硝化菌菌体量の多少によっても左右されるものであり、硝化菌は、MLSS中に存在すると考えられることから、2)の状態では、処理水中の浮遊物の多少によっても、N-BOD値は変化すると想定される。処理水におけるN-BODの問題は、処理水という段階が、窒素基質と硝化菌の共存の可能性が高いこと、本来、処理の対象としていない物質の挙動により、分析値が大きく左右されることにある。

2.2 事 例

下水処理場においては、水需要が予定通りに伸びないこと等により、処理施設の負荷が計画値に比べて低い状態で運転されている例が、数多くみられる。そうした処理場のひとつであるA処理場では、施設増設後、放流水BODが基準値を超過するケースが多くなった。Fig-2に示すように、処理水BODの内訳を検討した結果、 $20\text{ mg}/\ell$ を超えるデータでは、N-BODの割合が多くなっている。¹⁾

宅地開発に関連するB処理場では、SRTを一定範囲に維持することにより、種々の負荷条件を設定し、処理状況を調査した結果、Fig-3に示すように、処理水BODの増加は、N-BODの増加により説明されることが示された。また、この調査では、前項の1)～3)に述べた内容が確認でき、N-BODの制御を考えた設計・運転管理の方法として、①硝化を完全に近い状態まで促進させるか、②処理系内で硝化菌の増殖が起らないように硝化を抑制させるかの2通りの考え方ができることが示された。ここでは、前者を「硝化促進型」、後者を「硝化抑制型」として、施設計画を検討していくこととする。

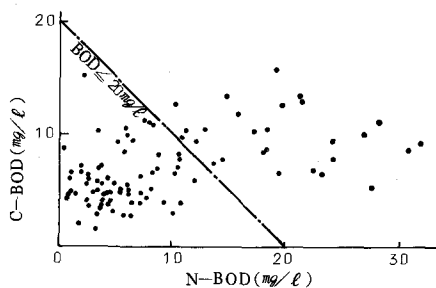


Fig. 2 C-BOD and N-BOD at plant A¹⁾

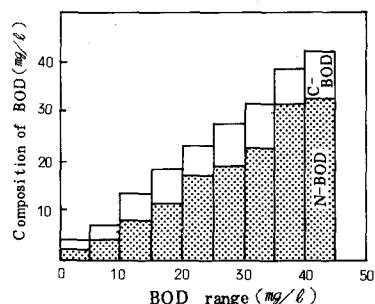


Fig. 3 Composition of BOD in effluent (B plant²⁾)

3. N-BODの制御を考慮した設計手順の提案

3.1 制御因子

N-BODのコントロールを行うためには、先に述べたように硝化反応を制御する必要がある。水処理系における硝化速度に影響を与える因子としては、水温、アルカリ度、pH、DO、基質濃度(NH_4^+ -N濃度)、SRT等があげられる。これらの因子のうちエアレーションタンクにおいて、比較的容易に硝化反応を制御できる因子としては、SRTとDOがあげられる。ここでは、SRTが系内に硝化菌量を維持するうえで重要であり、後述するように、BOD-SS負荷とも関係するところから、設計の段階で考慮すべき制御因子としてSRTをとりあげる。

水処理系内(エアレーションタンク・最終沈殿池)において、硝化菌を維持し得るかどうかは、(1)式に示すSRT(θ :硝化菌の増殖は、好氣的条件下で起るものと考えられるため、エアレーションタンクの汚泥滞留時間とする。)と硝化菌の比増殖速度(μ_N)の関係より判断でき、硝化の促進あるいは抑制の必要条件となる。

$$\theta \geq 1/\mu_N \quad \dots\dots\dots(1)$$

μ_N については、温度依存性が強く、 $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^-$ の反応を担うNitrosomonasの比増殖速度として、次のような報告がある。⁴⁾

$$\mu_N = 0.18 \times e^{0.116(t-15)} \quad \dots\dots\dots(2)$$

(1)、(2)式から水温に対して、硝化菌の維持に必要なSRTを求めることができる。

なお、エアレーションタンクのDOに関しては、硝化促進にとって $1 \sim 2\text{ mg}/\ell$ 以上確保することが条件となり、⁵⁾

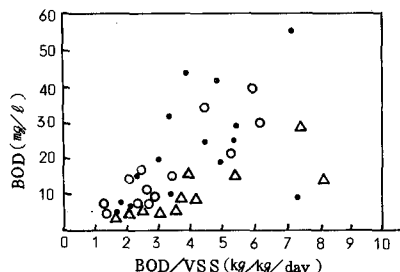


Fig. 4 Relationship effluent BOD and BOD/VSS load²⁾

$$\begin{cases} \bullet & t \leq 15^\circ\text{C} \\ \circ & 15 < t \leq 22^\circ\text{C} \\ \triangle & 22^\circ\text{C} < t \end{cases}$$

運転段階において、ひとつの重要な制御因子と考えられる。

3.2 SRTとBOD-SS負荷の関係

硝化反応の制御因子としてのエアレーションタンクにおけるSRTと、設計指標であるBOD-SS負荷(B_L)の関係を求める。

B_L 及び θ をそれぞれ、(3)、(4)式で定義する。

$$B_L = \frac{L_{in} \times Q \times 10^{-3}}{V_a \times S_a \times 10^{-3}} = \frac{L_{in} \times 24}{S_a \cdot T} \quad (3)$$

$$\theta = \frac{V_a \times S_a \times 10^{-3}}{\Delta S} \quad (4)$$

(4)式における ΔS は、系内の生物量を定常状態に保つためには、1日当り発生汚泥量に等しくとる必要がある。発生汚泥量について一般に用いられている除去基質の汚泥への転換項と、汚泥の自己分解を考慮した(5)式を用いれば、 θ は、(6)式のように表わせる。

$$\Delta S = a \times Q \times L_r \times 10^{-3} - b \times S_a \times T \times 10^{-3} \quad (5)$$

$$\theta = \frac{S_a \cdot T / 24}{a \times L_r - b \times S_a \cdot T / 24 \times T} \quad (6)$$

さらに、 θ と B_L の関係が示せるように変換すれば、

$$\frac{1}{a} \times \left(\frac{1}{\theta} + b \times T \right) = \frac{L_r \times 24}{S_a \cdot T} \quad (7)$$

となる。C-BODの除去率は90%を超えるものと考えて差しつかえないので、 $L_r \approx L_{in}$ とすれば、(7)式の右辺は、BOD-SS負荷となる。

B処理場の調査結果では、水温15℃以下、SRT2.8日、BOD-VSS負荷0.72の条件で硝化が抑制され、N-BODが低く抑えられた(Fig.4参照)。

B処理場における調査例、ならびにBOD-SS負荷とSRTの関係等より、施設の負荷条件と処理水BODの関係を概念的に示すとFig.5のようになる。

3.3 設計手順

硝化抑制型の施設においては、(1)、(2)式より得られる水温と系内での硝化菌の増殖を抑制するSRTの関係、設計流入条件を設定したうえで得られる(7)式に示す θ と B_L の関係をもとに施設の負荷条件は、設定できる。この過程をFig.6に示す。

同様に、硝化促進型エアレーションタンクにおいて、硝化菌を系内に維持するために必要な施設の負荷条件についても設定できるが、N-BODは処理水中の残存 NH_4^+-N 濃度に関連するため、硝化速度について検討し、処理水 NH_4^+-N を求めておく必要がある。

硝化速度については、基質濃度との関係において理論的には、Monod型の反応になることが知られているが、⁶⁾ その飽和定数は0.5mg/l程度と小さく、とくに NH_4^+-N の低濃度領域について議論しない限り、硝化反応は、基質濃度に依存しない

Table-1 Explanation of symbols

B_L ; BOD-cell load (BOD/VSS) (kg BOD/kg SS·day)
θ ; sludge retention time (SRT) (days)
L_{in} ; effluent BOD concentration (mg/l)
Q ; flow rate (m ³ /day)
V_a ; capacity of aeration tank (m ³)
S_a ; MLSS concentration (mg/l)
T ; aeration time (hr)
ΔS ; quantity of sludge extracted (kg/day)
a ; yield coefficient in gross (kg/kg BOD removed)
L_r ; C-BOD removed (mg/l)
b ; endogenous decay coefficient (day ⁻¹)
T ; MLVSS/MLSS
μ_N ; maximum specific growth rate of nitrifying bacteria (day ⁻¹)
t ; water temperature (°C)
N_r ; nitrified NH_4-N (mg/l)
g_N ; nitrification rate (mgN/gMLSS/hr)

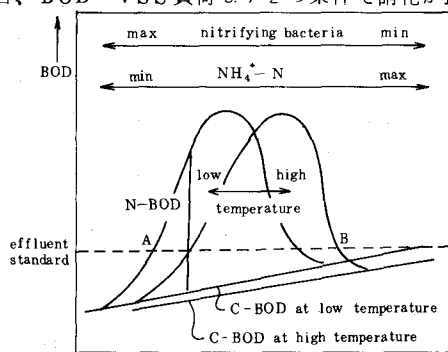


Fig. 5 Conceptual relationship between loading condition of plant and BOD in effluent

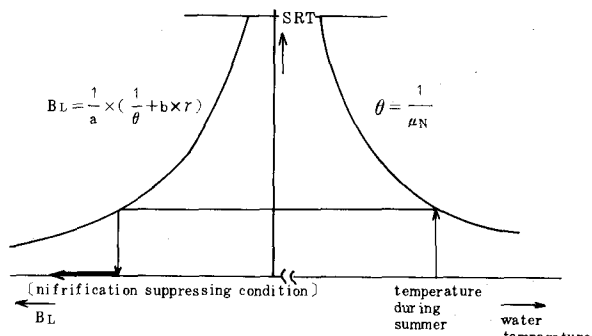


Fig. 6 Set-up B_L for suppressing nitrification

0次反応と仮定しても、差しつかえないと考えられる。

また、硝化速度のMLSS濃度依存性については、次のように考えることができよう。MLSS濃度は、菌体量を直接示す指標ではなく、とくに硝化菌の量は、エアレーションタンク内での硝化量を反映して異なるものと考えられる。Fig. 7に硝化菌数と(4)式で定義したSRTの関係を表した一例を示すが、SRTが約10日以内の範囲では、硝化菌数は、SRTに比例関係にあることが示されている。SRTの増大に伴い、MLSS濃度は、(7)式より判断して比例的に増大するところから、このSRTの範囲ではMLSS濃度と硝化菌量は、ほぼ比例すると考えられ、エアレーションタンクで起きている硝化反応のモデルとして(8)式の示すように考えることができる。

$$Nr = gn \cdot Sa \cdot T \cdot 10^{-3} \dots\dots(8)$$

また、硝化促進型施設における処理水 NH_4^+-N 濃度の目標値としては、図-2、3からC-BODとして、 $10\text{ mg}/\ell$ 前後と想定すれば、BODを $20\text{ mg}/\ell$ 以下にするためには、N-BODとして、 $10\text{ mg}/\ell$ 以下に抑える必要があり、 NH_4^+-N 濃度は、 $2\text{ mg}/\ell$ 程度まで硝化する必要がある。

ここで、設計指標として取り扱ったBOD-SS負荷と、これに関連する因子を硝化反応のコントロールと関連付けてまとめたのが、Fig. 8である。このうち、着色を施した部分については、Table 2に示すように、今後関連因子との定量的関係を含めて、検討の余地のある項目である。

3.4 両タイプの特徴の比較

前項では、硝化促進型、硝化抑制型の2つのエアレーションタンクのタイプについて、BOD-SS負荷を設定する基本的手順を示した。さらに容量算定を行うためには、種々の設計上の配慮が必要となる。

また、放流水質を制約条件とした施設計画においても、直接的に経済性に結びつく施設の負荷条件やこれを確保するための施設容量以外にも以下に示すような評価項目についても検討する必要がある。

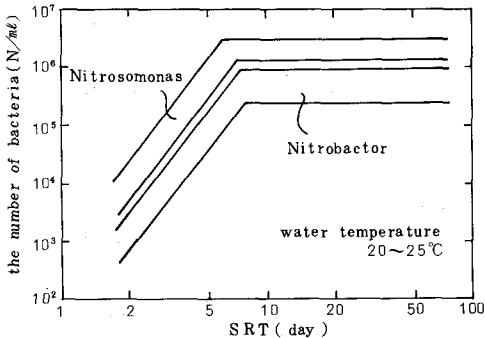


Fig. 7 Relationship between SRT and the number of nitrifying bacteria⁷⁾

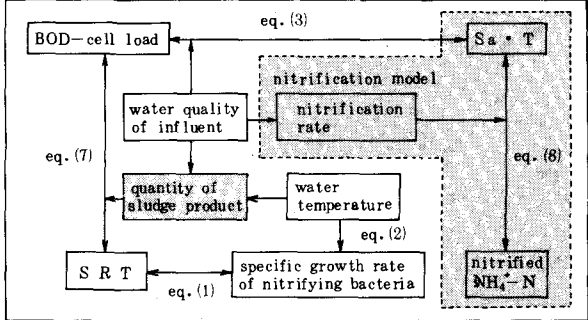


Fig. 8 Parameters concerning BOD-cell load

Table-2 Subjects need to solve in Fig. 8

Items	Subjects
nitrification model	○ 流入水質条件、とくにBOD/N比、流入水の窒素組成等の考慮 ○ 負荷条件たとえばケルダール窒素/MLSS比と硝化速度の関係 ○ 流入有機態窒素の取扱いと脱アミノ反応速度 ○ pH、DO等の因子と硝化速度の関係の考慮 ○ SRTの長い条件や低NH_4^+-N濃度まで処理する場合の硝化反応モデル
quantity of sludge product model	○ 流入水性状の取扱いにより、種々のモデル(たとえば、無機性SSを別途算定したり、SS成分と溶解性基質に分けて扱うなどの方法が考えられる)が考えられるが、これらの精度と適用性 ○ (5)式に示すモデルの場合、各パラメータ値に対する影響要因の抽出とその定量的関係 - 例えば a — SRT、流入水性状 - b — SRT、水温 - r — SRT、MLSS濃度、流入水性状

1) 時間オーダーでの負荷変動に対する処理水質の安定性

Table-3 Comparison of characteristics for nitrification advancing and suppressing type

	items	advancing type	suppressing type
2) 高度処理化や、窒素・リン除去施設への対応等の施設の柔軟性	エアレーションタンクの機能 SRTの必要条件 BOD-SS負荷	有機物分解+硝化 硝化菌の比増殖速度の逆数より大 小	有機物分解 硝化菌の比増殖速度の逆数より小 大
3) 発生汚泥量及び汚泥性状	必要酸素量 処理水C-BOD	大 抑制型より低い	小 促進型より高い
4) 供用開始当初のように施設に余裕が生じた場合の対応	発生汚泥量 問題点とその対策	小 pHの低下に対してはアルカリ剤添加あるいは返送汚泥率を高くて脱窒及びアルカリ回収を図る。この場合の必要容量の検討。 流入水NH ₄ ⁺ -Nの時間変動の考慮。	大 流入負荷変動の影響を受ける可能性があり、最小の滞留時間の検討が必要。 計画汚水量以下の流入に対して、DOコントロールや使用池数のコントロールが必要。

今後は、これらの点を考慮した設計ならびにこれらの評価要因の総合化を図るプロセスが要請されよう。

Table-3に両タイプの特徴と合わせて、問題点、設計上の留意事項についてまとめた。

4. 河川水質による施設計画案の評価

4.1 概 説

下水処理水を河川へ放流することによるインパクトは、放流水質特性及び放流先の河川特性によって異なったものとなる。このため、施設計画案が放流水質基準を満足できるものであっても、その評価に際して、前記特性をふまえた河川水質への影響をも考慮すべきケースが多いものと考えられる。この場合、河川状況を表わす種々のパラメータ及び利水状況に応じて適用されている各種の水質基準（環境基準、各種用水基準等）と、施設計画の関連について考慮された評価プロセスが必要である。

前項で述べたN-BODを考慮した施設計画では、その処理水質において窒素の形態組成が全く異なる2つの設計方針が提示された。それらはいずれもBODで定められた放流水質基準を満足しているが、NH₄⁺-Nに起因した影響に着目するならば、河川に対するインパクトは同一ではないと考えられる。具体的には現在の知見から、①水道水源、農業用水等の利水障害、②水産生物に対する毒性、③硝化の進行に伴う河川水のDO消費等が予想され、これらの影響程度は河川の流況や利水状況等により左右される。

このような理由から、検討対象とする水質指標としてNH₄⁺-Nをとりあげ、A川を対象とした事例において、①施設計画における施設の負荷と放流水質、②河川状況パラメータ、③懸案地点の水質について定量的な関係を明らかにした。また、それをもとに水質基準値が施設計画にどの程度の制約を与えているかを検討した。そして、それらの検討を通じて、河川水質による施設計画の評価プロセスの一端を示した。

4.2 シミュレーションモデル

河川水中におけるNH₄⁺-Nの硝化過程については、次のような状態方程式が提案されている。

$$-\frac{\partial N}{\partial t} + DL \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} - V \frac{\partial N}{\partial x} - KN + Na = 0 \quad \dots\dots\dots(9)$$

- | | |
|---|-----------------------------------|
| N ; 河川水のNH ₄ ⁺ -N濃度 (mg/l) | K ; 硝化速度定数 (1/sec) |
| t ; 時 間 (sec) | DL ; 拡散速度定数 (m ² /sec) |
| x ; 流下方向の距離 (m) | V ; 河川流速 (m/sec) |
| Na ; 流域からのNH ₄ ⁺ -N供給量 (mg/l·sec) | |

左辺は第1項より順に非定常項、拡散項、移流項、硝化による減衰項、流域からの流入を表わす定常項となっている。ここで、検討対象とするA川においては、拡散によるNH₄⁺-Nの変化はほとんど期待されず、

また水質評価をある時点（水質測定時）の流況でおこなうものとして、第1項と第2項を省略した次式を用いる。

$$V \frac{dN}{dx} + KN = Na \dots\dots\dots (10)$$

4.3 施設計画案と河川状況パラメータの関連

A川に対する検討事例においては、次のような条件を設定した（図-9参照）。

1) 処理場地点下流に上水取水点があるのでこれを基準点とし、そこでの NH_4^+-N 濃度 N を検討する。同地点においては、上水道の用水基準 N_c （緩速汚過法に対する NH_4^+-N $0.5 \text{ mg}/\ell$ ）を満足することが要求される。

2) 河川状況パラメータとしては、処理場上流地点での NH_4^+-N 水質 N_0 と流下距離 ℓ の2項目を考慮した。

3) 施設の負荷条件と処理水 NH_4^+-N 濃度の関係については、硝化抑制型、促進型エアレーションタンクのそれぞれの設計BOD-SS負荷と考えられるFig.-4中のA点、B点における負荷率に対し、処理水 NH_4^+-N 濃度を各々 $2 \text{ mg}/\ell$ 、 $20 \text{ mg}/\ell$ とし、この2点の負荷率に対して計算を行った。

これらの条件のもとで(10)式と、実測データより同定した K 、 Na の値を用い、基準点における NH_4^+-N 濃度を計算した。 ℓ 、 N_0 をパラメータとして計算した結果の1例をFig.-10に示す。これによると、 $40 \text{ km} \leq \ell \leq 60 \text{ km}$ の範囲では

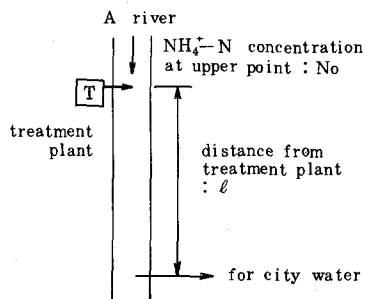


Fig.-9 Model of A river

A点より小さな負荷条件の施設計画のみが許容され、 $\ell < 40 \text{ km}$ になると負荷条件の範囲はさらに小さな方向へと狭められる。逆に、 $\ell > 60 \text{ km}$ では、B点より大きな負荷条件の施設計画も許容され、許容範囲が広がる。一方、 $\ell = 60 \text{ km}$ の場合には、A点より小さな負荷条件の施設計画のみが許容され、 N_0 の違いによる許容範囲の変動は小さい。

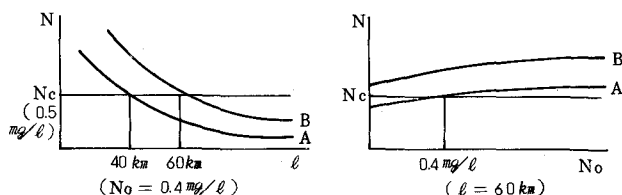


Fig.-10 Effects of river conditions on NH_4^+-N concentration for various BL of a plant

このようなことから、河川水質からみた施設計画案の評価においては、パラメータの抽出とその影響の程度、感度分析等をおこなうことが重要と考えられる。

4.4 施設計画案と水質基準の関連

4.3では現行水質基準を前提として、施設計画案の許容範囲を示したが、ここではそれらの水質基準を変えたときの許容範囲の変動状況から、水質基準値が施設計画に与える制約の度合を明らかにする。上記事例においてBODの放流水質基準 B_c を全BODでなくC-BODで達成する場合と、上水道用水基準 $N_c = 0.5 \text{ mg}/\ell$ (NH_4^+-N)を

緩和した場合の施設計画の許容範囲を、パラメータ ℓ 、 N_0 の各々のケースについてFig.-11に示した。それらによると、水質基準が緩和されることによって、いずれも許容範囲は広がる

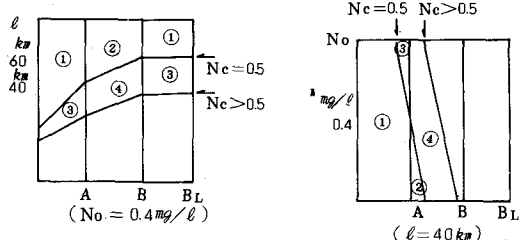


Fig.-11 Effects of constraints of effluent standard and water quality for utilization and river conditions on BL of plant

- ① 現行水質基準のときの許容範囲
- ② B_c をC-BODで達成するときの拡張範囲
- ③ N_c を緩和したときの拡張範囲
- ④ ②、③を同時に起こったとき、②及び③に追加される拡張範囲

が、それらの大きさは、 ℓ 及び N_0 の設定条件によって様々である。このことから、水質基準が施設計画案に与える制約の度合は、河川の状況に応じて異なったものとなることが予想される。したがって、河川水質からみた施設計画案の評価に際してそれらを明らかにし、評価プロセスに反映させることも必要であろう。

4.5 ま と め

本節の内容を要約すると、河川状況パラメータや各種水質基準を含めた総合的な評価が要求される場合には、その評価プロセスとして、①シミュレーションモデルの選定、②必要なパラメータの抽出と施設計画に対する感度分析、③水質基準が施設計画に与える制約度合の検討を組み込む必要があるということである。さらに評価結果のフィードバックも施設計画案のみでなく、その他の水質保全対策を含めて多様に検討する必要がある。

5. おわりに

本報における考察で得られた内容を要約すると、以下の通りである。

1) 下水処理水の BOD 値は、Fig. 2、3 にみられるように、 $N-BOD$ の増加のため大きく変化し、この対策のためには、硝化反応のコントロールが必要であり、この点を考慮した施設計画の方針を提案した。

なお、下水処理プロセスにおける窒素の挙動を、いかに施設計画にとり込むべきかについては、硝化反応の理論的側面ならびに実証を含めて検討していかなければならない重要な課題と考えられる。

2) 河川水質により、処理施設計画を評価する場合、河川状況を示すパラメータ、放流基準、水質基準点水量の間の定量的関係、さらに施設設計条件と放流水質の関係を定量的に把握する必要がある。4 で行った事例計算では、検討対象水質項目として NH_4^+-N をとりあげ、放流点と基準点間の距離及び放流点上流の負荷量をパラメータとし、定量的関係を扱った。ここでの検討は、河川状況を表わすパラメータと基準点水質から、放流水質基準を満足する施設計画案を評価するひとつの手順と考えることができる。

さらに、本稿での検討等を通して、今後以下の点について議論が必要になろう。

- 1) 下水道整備計画において、重要な水質指標とされてきた BOD の適用範囲の検討と他の指標の重要性
- 2) 下水道整備計画における水質保全上の目標レベルの設定
- 3) 下水道整備計画における公共用水域での水質評価システム

最後になりましたが、本報作成にあたり、住宅・都市整備公団 正木文憲 氏には、貴重な助言をいただき、また、株式会社日水コン、システム開発室萩原良巳、蔵重俊夫の両氏には、終始熱心な討議・協力をいただきました。ここに謝意を表する次第であります。

参考文献

- 1) 下水道試験方法改定委員会：小委員会活動報告——法定試験方法の検討——，下水道協会誌，Vol. 18，No. 208，1981.
- 2) 日本下水道協会・住宅・都市整備公団：宅地開発に関連する小規模下水処理施設技術基準調査報告書，昭和 57 年 1 月
- 3) 住宅・都市整備公団：宅地開発に関連する小規模下水処理施設技術資料，昭和 57 年 1 月
- 4) U. S. EPA：Nitrification and Denitrification Facilities (EPA Technology Transfer Seminar Publication)，August，1973.
- 5) U. S. EPA：Process Design Manual for Nitrogen Removal，Technology Transfer，October，1975.
- 6) 赤井・三木・大垣：硝化作用のモデル計算と塩分による阻害について，土木学会年講，1982.
- 7) 八木橋・小堀・落：活性汚泥中の硝化菌および脱窒菌に関する研究，下水道協会誌，Vol. 18，No. 207，1981.
- 8) Bansal, M. K.：Nitrification in Natural Streams，Journal WPCF，Vol. 48，No. 10，1976.