

下水処理場の硝化に関する研究 (その1)
——窒素成分排出の実態——

嶋津暉之 木村賢史 三好康彦

要 旨

下水処理場における硝化促進の可能性を検討するため、下水処理場の実態調査を行った。その結果、下水処理場処理水の窒素関係成分には次の特性がみられた。

- ① 処理水の $\text{NH}_4\text{-N}$ は時間変動が大きく、最大と最小の差が平均の1倍を超えることが多い。処理水 $\text{NH}_4\text{-N}$ の上昇を引き起こすのは、流入水量の増加による処理時間の減少と、流入窒素負荷量の増加である。
- ② 処理水 $\text{NH}_4\text{-N}$ は一日のうちで午後0時前後の時間帯、すなわち、立ち入り調査でスポット採水を行うような時間帯で最小に近い値を示すことが多い。したがって、スポット採水による試料では、下水処理場の $\text{NH}_4\text{-N}$ の排出量を過小評価し、硝化の進行状況を過大評価することになりやすい。
- ③ 処理水のN-BODを規定する二つの因子、 $\text{NH}_4\text{-N}$ と硝化菌存在量のうち、主にN-BODの値をきめるのは後者である。硝化が進んで $\text{NO}_x\text{-N}$ が高い処理水は硝化菌の混入が多くなり、 $\text{NH}_4\text{-N}$ がある程度残留していると、その多寡にかかわらず、N-BODが高くなりやすい傾向にある。

1 はじめに

多摩川の中下流部、田園調布堰の水質を例にとれば、平成3年度のBOD75%水質値は約6 mg/lで、環境基準5 mg/l (C類型)を上回っている。しかし、このBODの構成をみると、平均では約4割が $\text{NH}_4\text{-N}$ の酸化、すなわち、硝化による酸素消費量 (N-BOD) であって、有機物の分解による酸素消費量 (C-BOD) は残りの6割である。したがって、多摩川のBOD環境基準を達成するためには、C-BODの削減を進めるとともに $\text{NH}_4\text{-N}$ の排出量を抑制してN-BODの低減に努める必要がある。また、 $\text{NH}_4\text{-N}$ は環境中では魚類等への毒性が強いため、その面でも $\text{NH}_4\text{-N}$ 排出量の抑制が必要である。

下水道の普及率が70%を超える多摩川流域において、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の削減をはかるためには、下水処理場における硝化を促進する必要がある。

今回、下水処理場における硝化促進の可能性を検討するため、多摩川流域を中心とする下水処理場の実態調査を行った。この調査データを用いて窒素関係成分の排出の実態を解析した結果を本報で、硝化促進の方法とその技術的条件を検討した結果を続報 (下水処理場の硝化に関する研究、その2) で報告する。

2 調査の対象と方法

(1) 調査対象

多摩川流域および隅田川流域にある6カ所の下水処理場を調査対象とした。内訳は、多摩川流域4、隅田川流域2である。

調査対象の1日平均処理水量はそれぞれ5万 m^3 、6万 m^3 、12万 m^3 、17万 m^3 、52万 m^3 、61万 m^3 である。このうち、5処理場は合流式下水道、1処理場は分流式下水道である。

(2) 調査方法

窒素成分の処理状況は水温の影響が大きいため、4処理場については夏、秋 (または春)、冬の延べ3回、2処理場については秋、冬の延べ2回、調査を行った。また、下水処理場は処理状況の時間変化の大きいことが予想されるので、4処理場については第1沈殿池出口、ばっ気槽出口、第2沈殿池出口に自動採水器を設置して24時間の時間別採水を行った。2処理場はスポット採水のみである。2施設に分かれている処理場もあるので、延べ調査施設数は24時間調査が11、スポット採水のみ調査が7である。

6処理場とも、その他に流入水、ばっ気槽各槽の混合液、余剰汚泥等をスポット採取するとともに、各工程水

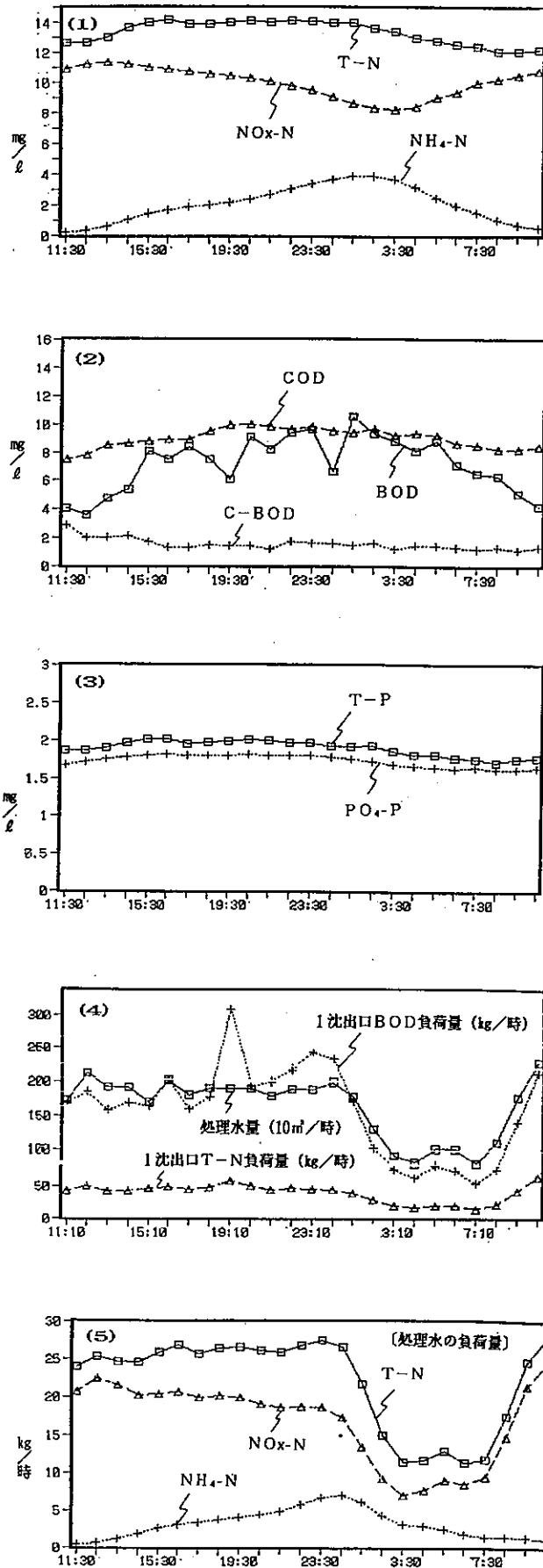


図1 処理水質の時間変動(A処理場5月)

の水温、pH、溶存酸素の現場測定を行った。また、ばっ気槽の混合液を持ち帰って酸素吸収速度、硝化速度、脱窒速度の測定を行った。

採取した検体の分析項目は流入水、第1沈殿水、第2沈殿水についてはBOD、C-BOD、COD、SS、T-N、TDN、NH₄-N、NO_x-N、T-P、TDP、PO₄-P、アルカリ度であり、ばっ気槽混合液、余剰汚泥についてはMLSS、MLVSS、T-N、T-Pである。

3 結果及び考察

(1) 処理水質の時間変動

ア 時間変動の実態

(ア) 硝化の進行率が高い処理場

一例として、硝化が8割以上進むA処理場5月における処理水質(第2沈殿池出口の水質)の時間変動を図1(1)~(3)に示す。この調査日は降雨がなく、平常の処理状況で、同図(4)のとおり、ばっ気槽の流入水量と流入負荷量に変化した。処理水質の変動幅はT-N12~14mg/l(平均13mg/l)、NH₄-N 0.2~3.9mg/l(2.0mg/l)、NO_x-N8.2~11mg/l(10mg/l)、BOD3.6~10.5mg/l(7.2mg/l)、COD7.5~10mg/l(9.0mg/l)、T-P1.7~2.0mg/l(1.9mg/l)である。これらのうち、NH₄-Nの変動幅が際だって大きく、最大と最小の差は平均の1.8倍もある。その他の水質項目のうち、BODは(最大-最小)/平均が1.0で、やや大きい、他の項目は0.2~0.3である。NH₄-Nの動きは同図(5)に示すように、流出負荷量でも同じである。このように、硝化がよく進む処理場ではNH₄-Nの変動が大きい。

NH₄-Nは午後0時前後が最小で、午後から夜にかけて上昇し、翌日の午前2時頃にピークになった後、次第に低下していく。立ち入り調査で通常、スポット採水を行うのは、午後0時近くの午前または午後であるから、スポット採水で得られるNH₄-Nは一日のうちで最小に近い値を示していることが多い。それも、最大と比べると、かなり小さい値である。

BOD、COD、T-N、T-Pも夜間に上昇する傾向がみられ、スポット採水を行う時間帯は最小に近い値を示しているが、COD、T-N、T-Pが変動幅が比較的小さいので、スポット採水の問題は特にはない。BODは(3)で述べるように、NH₄-Nの変動によりN-BODのやや大きな変化が生じることがあるので、この例のようにスポット採

水の問題がみられることがある。

(イ) 硝化の進行率が低い処理場

次に、硝化の進行が4割程度のD処理場7月における処理水質の時間変動を図2(1)に示す。この調査日も降雨がなく、流入水量と流入負荷量は同図(2)のとおり変化した。処理水NH₄-Nの変動幅は3.9~6.8mg/ℓ (平均5.1mg/ℓ)、(最大-最小)/平均は0.6であり、A処理場と比べて、変動が小さい。このように、硝化の進行率が比較的低い処理場の場合にはNH₄-Nの変動が小さくなる。しかし、それでも、T-Nの(最大-最小)/平均0.4と比較すると、NH₄-Nの変動は大きい。時間的に大きく変動するのが処理水NH₄-Nの特徴である。

この処理場の場合もNH₄-Nは午後0時前後が最小で、午後8時頃、ピークになるから、前述のように午後0時前後のスポット採水ではNH₄-Nを過小評価することになる。

(ウ) 大きな降雨があった場合

降雨により流入水量が増加した場合の例として、C処理場6月の処理水質の時間変動を図3(1)に示す。府中地点の観測では午後3時台から翌日の午前10時台まで合計107mmの降雨があった。降水量が特に大きかったのは午後6時台から午前2時台までである。当処理場は分流式であるが、マンホール等からの雨水排水の侵入で、同図(2)のように処理水量が増加し、午後10時のピーク時には午後0時頃の3倍近くになった。

NH₄-Nは午後0時から午後7時までは0.3~0.6mg/ℓで、1mg/ℓ以下の値を示し、硝化が非常によく進行していた。しかし、午後8時以降、急速に上昇して11時にはピークの6.6mg/ℓになり、その後、低下し、午前4時には1mg/ℓ以下に戻った。(ウ)で述べた例からみて、降雨がなくても、夜間におけるNH₄-Nの上昇は多少はあると考えられるが、この場合は処理水量の急増でNH₄-Nが急上昇している。NH₄-Nの一日の変動幅は0.3~6.6mg/ℓ (平均1.6mg/ℓ)で、(最大-最小)/平均は3.9である。T-Nの変動もみられるが、(最大-最小)/平均は0.6で、NH₄-Nと比べると、はるかに小さい。

イ 時間変動の大きさ

以上、三つの調査データを例にとり、NH₄-N等の水質変動の状況をみたが、それぞれの条件によって変動の大きさが異なる。24時間調査の11データについて処理

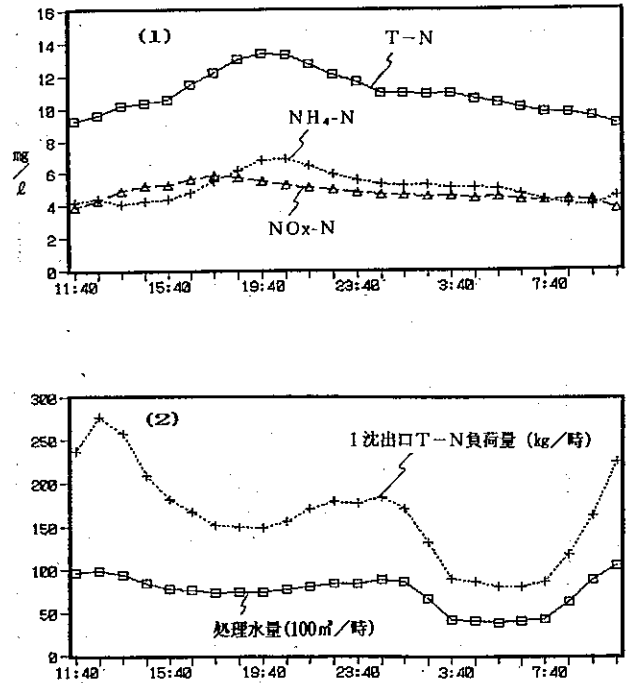


図2 処理水質の時間変動(D処理場7月)

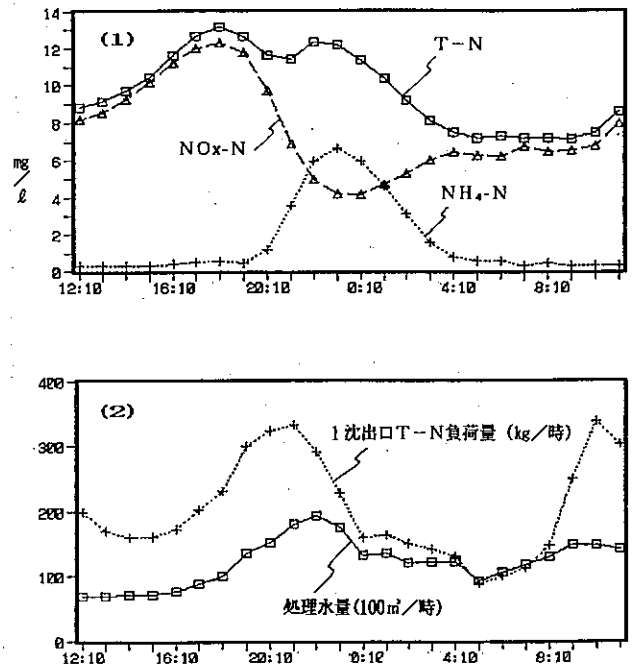


図3 処理水質の時間変動(C処理場6月)

水質の変動幅の分布を調べた結果を図4、5に示す。図4は(最大-最小)/平均の分布である。BOD、COD、T-N、T-Pは11データのうち、8~11件が1以下である。

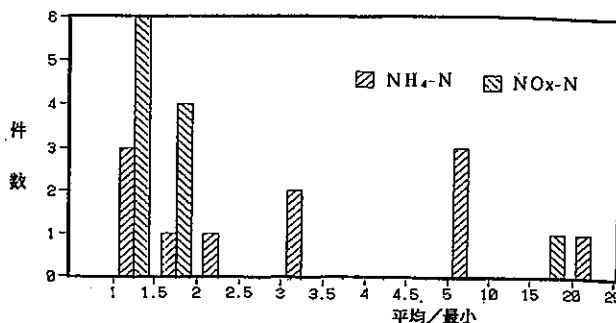
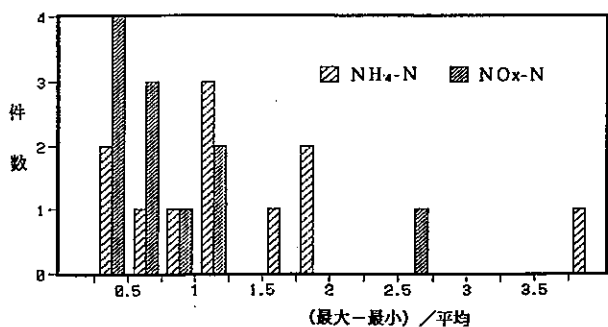
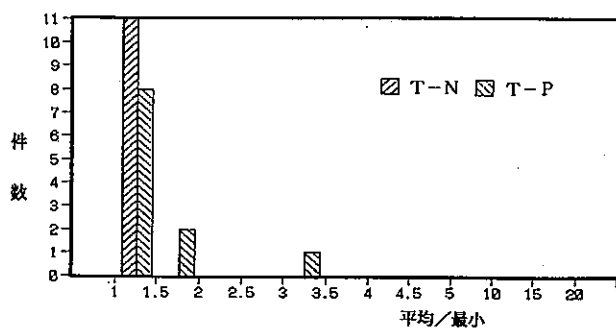
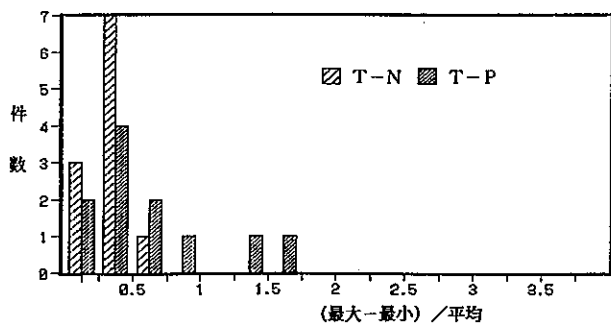
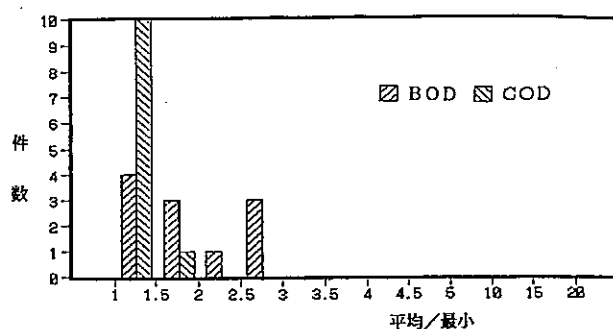
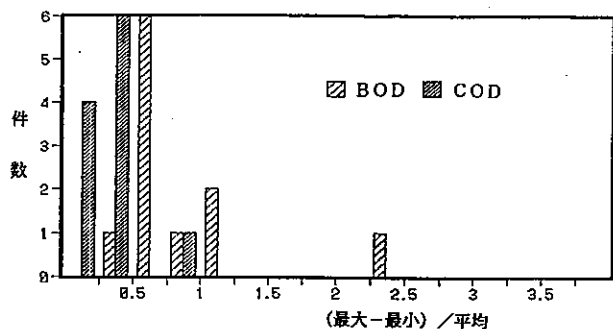


図4 処理水質の(最大-最小)/平均の分布

図5 処理水質の平均/最小の分布

しかし、NH₄-Nは(最大-最小)/平均が1を超えるものが7件もあり、他の水質項目と比べて変動幅が大きい。

特に問題となるのは前述のようにスポット採水を行うような時間帯が一日の最小に近い値を示すことである。スポット採水で得られる水質と一日平均水質との関係を考える参考として、図5の一日平均/最小の分布をみると、NH₄-N以外の水質項目は大半のデータが2倍以下であるが、NH₄-Nについては11データのうち、7件が2倍を超える値を示している。このように、下水処理場についてはスポット採水の試料でNH₄-Nの排出状況や硝化の進行状況を判断することはむずかしい。NH₄-Nの排出量を過小評価し、硝化の進行状況を過大評価することになりやすい。この点で、下水処理場のNH₄-Nの排出状況を的確に把握するためには、24時間の水質調査を行う必要がある。

ウ NH₄-Nの時間変動の要因

下水処理場流入水の窒素の形態は有機性窒素とNH₄-Nであるが、このうち、有機性窒素のほとんどはばっ気槽で分解されてNH₄-Nになる。これらのNH₄-Nの一部は汚泥に取り込まれ、一部は硝化菌の働きで硝化されてNO_x-Nに変わる。ばっ気槽の硝化能は〔ばっ気槽の硝化速度〕×〔ばっ気槽での処理時間〕で示される。硝化速度はばっ気槽に存在する硝化菌の菌体量と活性度によってきまる。したがって、処理水のNH₄-Nは概念的には次式で示される。処理水NH₄-N負荷量=①流入窒素負荷量-②汚泥移行窒素量-③(ばっ気槽硝化速度×処理時間)

この式で②を一定とすれば、処理水NH₄-Nの上昇は①の増加と③の減少、すなわち、次の二つの要因によって引き起こされると考えられる。

- i ばっ気槽の流入水量の増加により、処理時間が短く

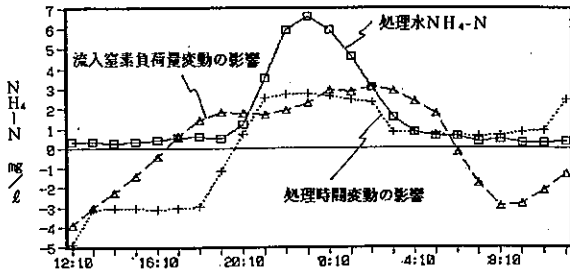


図6 処理水NH₄-Nへの変動要因の影響(C処理場6月)

なって③の硝化能が小さくなる。

ii ①の流入窒素負荷量の増加により、③の硝化能と②の汚泥移行窒素量の合計を上回る窒素負荷量が大きくなる。

C処理場6月を例にとってこの二つの要因で処理水NH₄-Nの時間変化をどの程度説明できるかを検討した結果を図6に示す。ただし、流入窒素負荷量の変動についてはばっ気槽による混合と返送汚泥による平均化を考慮して、適当な移動平均をとり、ばっ気槽および第2沈殿池通過によるタイムラグを設けた。処理時間の変動は硝化能の変化に換算し、NH₄-Nの変化を説明できるよう、+-を逆に示した。この場合も第2沈殿池通過によるタイムラグを設けた。

同図をみると、夜間における処理水NH₄-Nの上昇の山は、流入窒素負荷量の増加が形成する山と、ばっ気槽処理時間の減少が形成する山によく対応している。この例では、二つの要因の影響度はほぼ同じである。

以上のように、流入水量と流入窒素負荷量の変動により、硝化能を上回るNH₄-N負荷が流出し、処理水NH₄-Nの大きな時間変動が引き起こされる。

(2) 平均処理水質

ア 平均処理水質の分布

処理場4カ所の24時間調査から得た一日平均処理水質の分布を図7に示す。T-Nは9~25mg/l、BODは5~8mg/lの範囲にある。全平均はそれぞれ14mg/l、6.8mg/lである。BODの全平均のうち、C-BOD、N-BODはそれぞれ3.2mg/l、3.6mg/lであり、N-BODが5割強を占めている。なお、CODは6~13mg/l(全平均9.1mg/l)、T-Pは0.4~1.9mg/l(1.2mg/l)である。

また、NH₄-Nは1.9~22mg/l(全平均6.3mg/l)、NO_x-Nは0.5~10mg/l(6.0mg/l)である。24時間調

査の対象には、硝化が比較的良好に進む処理場2カ所が含まれているため、NH₄-Nの全平均はやや低めの値になっている。24時間調査の11データにスポット採水調査の7データを加えると、NH₄-Nの全平均は7.9mg/lとなる。

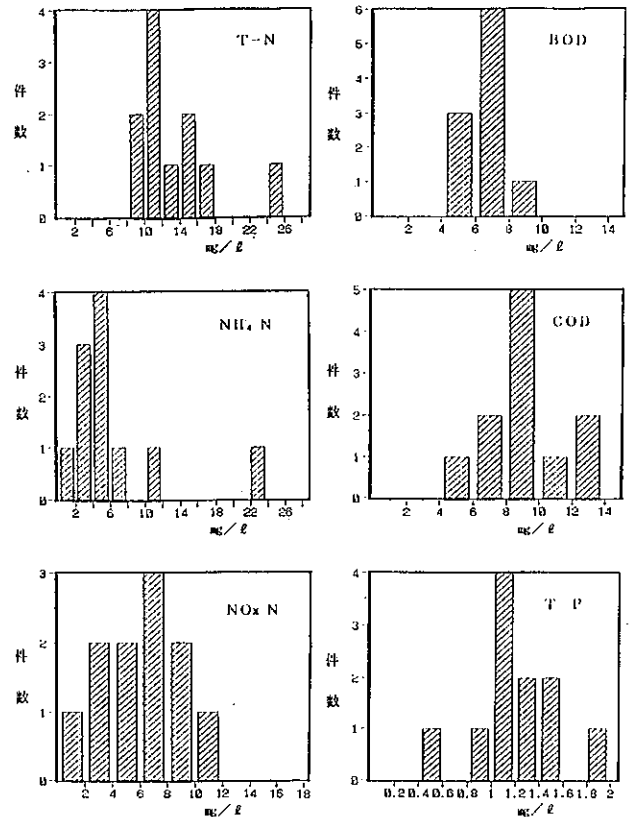


図7 処理水の一日常平均水質の分布

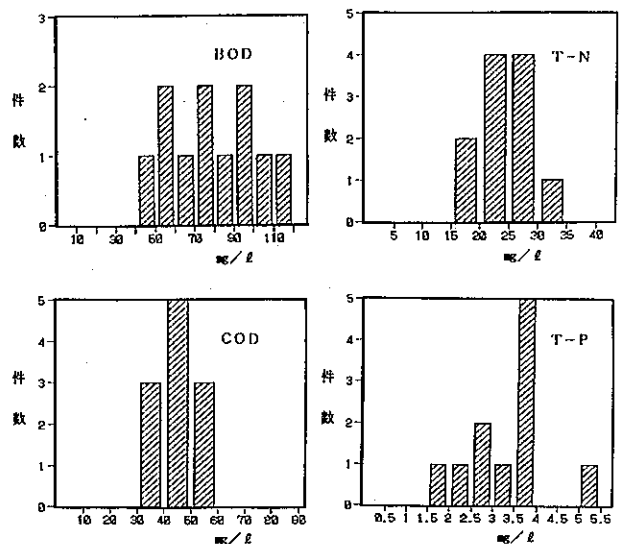


図8 第1沈殿池出口の一日常平均水質の分布

イ 第1沈殿池出口の水質と二次処理の除去率

24時間調査による第1沈殿池出口の一日平均水質の分布を図8に示す。第1沈殿池出口のT-NとBODの全平均はそれぞれ24mg/l、80mg/l、二次処理の平均除去率は44%、91%である。ただし、処理水のN-BODを除くと、BODの除去率は96%になる。また、COD、T-Pのそれぞれの値は44mg/lと79%、3.3mg/lと32%である。

下水処理場では二次処理の前に第1沈殿池でSSの一部除去が行われる（一次処理）。また、汚泥処理の過程から第1沈殿池への窒素、りん等の回帰もある。下水処理場全体の処理状況を知るため、窒素、りんの収支を調べた例を図9に示す（A処理場5月）。第1沈殿池の前に余剰汚泥、濃縮槽上澄液、脱水機分離液が返送されている。これらの窒素、りん量を第1沈殿池引き抜き汚泥（1沈汚泥）中の窒素、りん量から差し引いて考えると、流入下水中の窒素の11%が1沈汚泥に移行し、89%がばっ気槽に流入する。二次処理の過程では19%が脱窒により窒素ガスとなり、19%が余剰汚泥に取り込まれ、残りの51%が処理水として放流される。また、りんの場合は第1沈殿池で流入下水中のりんの15%が1沈汚泥へ、残

り85%がばっ気槽に流入し、そのうち、40%が余剰汚泥へ、45%が二次処理水として放流される。なお、最終的に脱水汚泥へ移行した窒素のほとんど（29%）は汚泥焼却により大気中に放出され、りん（55%）は焼却灰へ移行する。

この例をみると、流入水中の窒素、りんの85~90%が二次処理に持ち込まれているので、上記の二次処理の除去率は下水処理場全体の処理状況を概ね示していると考えられる。

ウ 硝化の進行状況

24時間調査データにより、各処理場の一日平均の硝化率を計算した。二次処理の過程で硝化された窒素のうち、一部は脱窒作用により、窒素ガスとなるので、その脱窒分も含めて次式から硝化N（硝化された窒素）を求めた。
 硝化N = (第1沈殿池出口T-N) - (第2沈殿池出口T-N) - (余剰汚泥移行N) + (第2沈殿池出口NO_x-N)

この式で求めた硝化N/第1沈殿池出口T-Nの分布を図10(1)に示す。11データの範囲は9~72%で、硝化率は処理条件により大きな差がある。11データの単純平均は44%である。

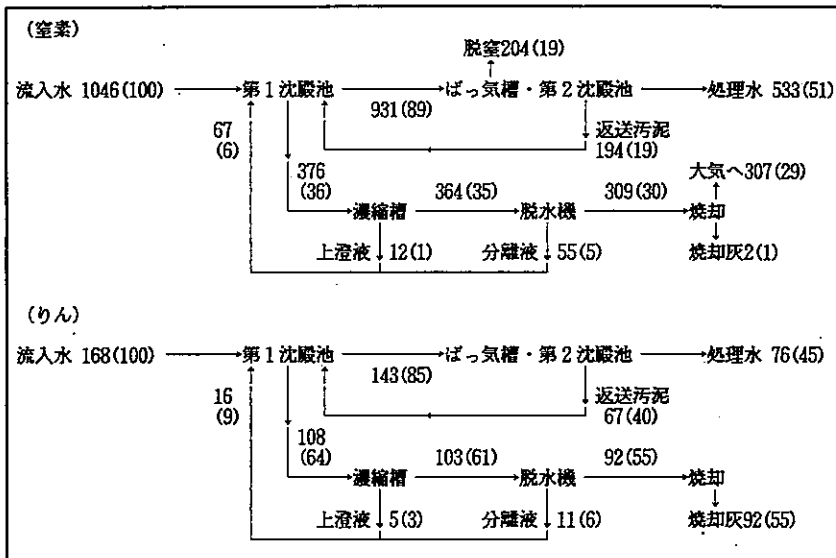


図9 下水処理場における窒素とりんの収支 (A処理場 5月)
 (単位 kg/日 ()内は%)

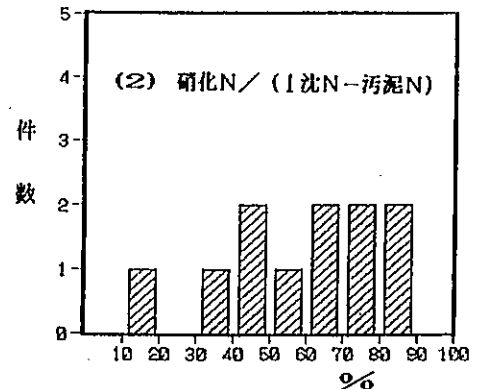
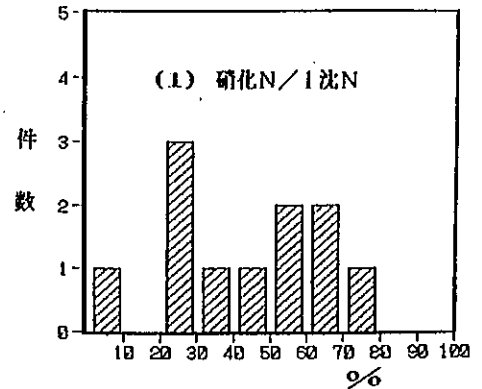


図10 硝化進行率の分布

下水処理場によっては余剰汚泥に移行する窒素が30%を超え、そのために硝化率がみかけ上、小さくなることがある。そこで、汚泥移行Nを除く窒素の硝化率をみるため、硝化N/(第1沈殿池出口T-N-余剰汚泥移行N)の分布を示したのが同図(2)である。11データの範囲は11~83%、単純平均は58%である。ただし、スポット採水の7データを含めた単純平均は47%である。これらの値が今回の調査対象とした下水処理場の硝化率である。

(3) 処理水のN-BOD

ア N-BODとNH₄-Nとの関係

処理水のN-BODとNH₄-Nの相関図の例を図11に示す。硝化が比較的良好に進むA処理場5月の場合、NH₄-Nが2 mg/l程度までは両者の間に比例的な関係がみられる

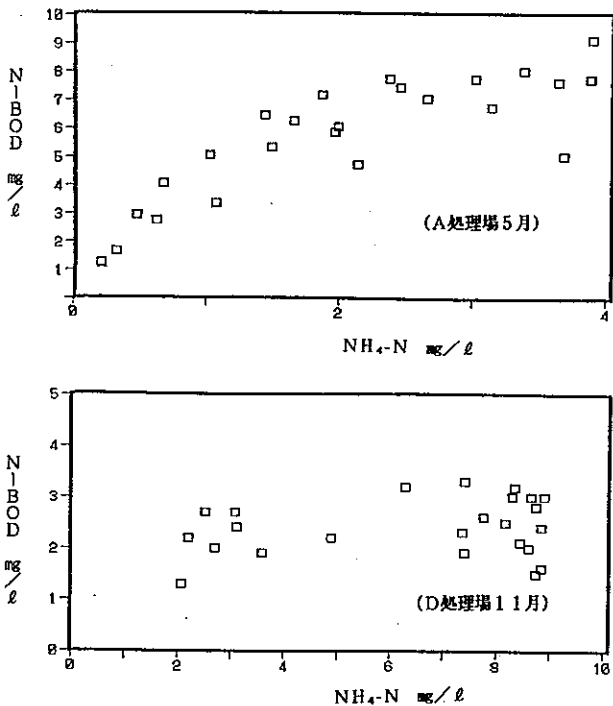


図11 処理水のNH₄-NとN-BOD

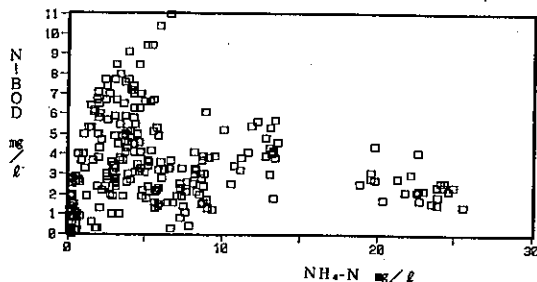


図12 処理水のNH₄-NとN-BOD(24時間調査の個データ)

が、2 mg/lを超えると、N-BODは5~9 mg/lの間で横這いに近い状態になる。硝化の進行率が比較的低いD処理場11月の場合、N-BODはNH₄-Nとは無関係に、1~3 mg/lの間を変動している。

このようにN-BODとNH₄-Nの関係は処理場によって差がある。そこで、24時間調査の個データをプロットしたのが図12である。NH₄-NとN-BODの関係はばらつきが大きい。NH₄-Nが7 mg/l程度まではNH₄-NとともにN-BODが増加するデータが少しある。N-BODの最大値は11mg/lで、その時のNH₄-Nは7 mg/lである。しかし、NH₄-Nが7 mg/lを超えると、N-BODは6 mg/l以下の範囲でばらつくだけとなる。

N-BODはNH₄-Nと硝化菌の存在量で規定される。硝化菌が十分に存在してNH₄-Nの全部がNO_x-Nに変われば、NH₄-N 1 mg/lで4.33mg/lのN-BODが検出される。なお、この4.33mg/lは、硝化菌の菌体生成に使われるNH₄-Nを除いた数字であるが、これについては続報で述べる。したがって、たとえば、NH₄-N 7 mg/lの場合、N-BODは30mg/lにまでなる可能性があるが、実際は上述のように11mg/lが最大である。

このように、処理水のN-BODにNH₄-Nの濃度が関係しているのは一部だけであって、大半のN-BODは硝化菌の存在量で規定されていると考えられる。

イ N-BODとNO_x-Nの関係

図13は、硝化菌の存在量に関係する因子としてNO_x-Nを取り上げ、24時間調査の個データをプロットして処理水のNO_x-NとN-BODの関係をみたものである。同図では処理水中のNH₄-Nが低く、その全量が酸化されてN-BODの値になっているデータ、すなわち、N-BOD ≥ 4.33NH₄-Nであるものは除外した(除外データ数32)。同図では、NO_x-Nが増加すると、N-BODが上昇する傾向が多少みられるが、ばらつきも大きい。

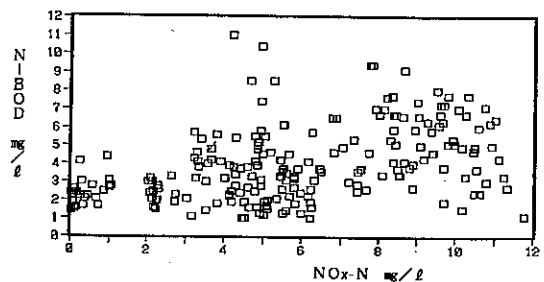


図13 処理水のNO_x-NとN-BOD(24時間調査の個データ)

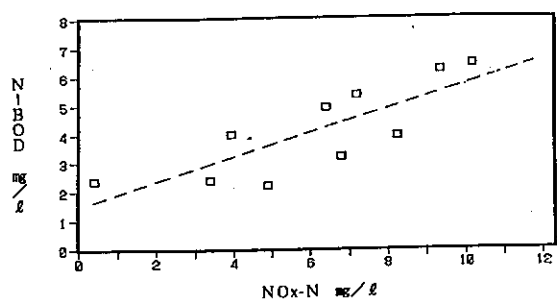


図14 処理水のNO_x-NとN-BOD(24時間の平均値)

しかし、各24時間調査データごとに平均をとって、NO_x-NとN-BODをプロットすると、図14に示すように、両者の関係が明確になり、相関関係がみられる(相関係数0.80)。硝化が進んでNO_x-Nが高い処理水は硝化菌の混入が多くなり、N-BODが高くなる傾向がある。

以上のように、下水処理場処理水のN-BODの値を主にきめるのは、硝化菌の存在量であり、NH₄-Nがある程度残留していると、その多寡にかかわらず、硝化が進むほど、N-BODが高くなりやすい。

4 おわりに

多摩川流域および隅田川流域の下水処理場を対象として窒素関係成分の排出の実態を調査したところ、次の諸点が明らかとなった。

① 処理水のNH₄-NはCOD等の水質項目に比べて時間変動が大きく、最大と最小の差が平均の1倍を超えることが多い。COD等は大半のデータが1倍未満である。

② 処理水NH₄-Nの上昇は、流入水量と流入窒素負荷量の増加により引き起こされる。前者は処理時間を短くしてばっ気槽の硝化能を小さくし、後者は硝化能を超えるNH₄-N量を増加させる。

③ 処理水NH₄-Nは一日のうちで午後0時前後の時間帯、すなわち、立ち入り調査でスポット採水を行うような時間帯で最小に近い値を示すことが多い。この点で、下水処理場のNH₄-Nの排出状況を的確に把握するためには、24時間の水質調査が必要である。

④ 今回、24時間調査を行った延べ11施設の硝化率(汚泥移行窒素を除く)は11~83%で、各施設の処理条件により、硝化率は大きな差があった。処理水の一日平均NH₄-Nは2~22mg/lの範囲にあった。

⑤ 処理水のN-BODとNH₄-Nの間に対応関係がみられるのは一部のデータだけで、大半の処理水のN-BODは硝化菌の存在量に規定されている。

⑥ 硝化が進んでNO_x-Nが高い処理水は硝化菌の混入が多くなり、NH₄-Nがある程度残留していると、その多寡にかかわらず、N-BODが高くなりやすい傾向にあった。

Study on Advancement of Nitrification in Sewage Treatment Plants (I)

—Actual Circumstances of Nitrogen Component Discharge—

Teruyuki Shimazu, Kenji Kimura and Yasuhiko Miyoshi

In order to examine the possibility of promoting nitrification in sewage treatment plants, we had an investigation into the actual circumstances of the sewage treatment plants centering around the Tamagawa basin. As a result, the following characters were found in the components related to nitrogen of the effluent in sewage treatment plants.

(1) NH₄-N in the effluent ranged badly depending on the time, and the gap between the maximum value and the minimum value was often as large as or larger than the average value. What caused the increase of NH₄-N in the effluent were the decrease of the treatment time due to the increase of the volume of raw sewage, and the increase of inflow nitrogen loads.

(2) NH₄-N in the effluent often pointed near the minimum value around 0:00 p.m. in a day, that is, when we usually make an on-the-spot inspection. For that reason, we are liable to underestimate the discharge volume of NH₄-N

in plants and overestimate the progress of nitrification by using the materials .

(3) There were two factors which decide the amount of N-BOD in the effluent , that is, $\text{NH}_4\text{-N}$ and nitrifying bacterium . It was the latter one that mainly decided the amount of N-BOD. The effluent which was progressive in nitrification and contained a large amount of $\text{NO}_x\text{-N}$ was liable to have a large amount of N-BOD.