

氏 名	徐 開 欽
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	平成 2 年 3 月 28 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 土木工学専攻
学位論文題目	都市河川における窒素の挙動に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 佐藤 敦久
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 佐藤 敦久 東北大学教授 野池 達也 東北大学教授 澤本 正樹

論 文 内 容 要 旨

水道水源の河川、湖沼など表流水への依存度は年々高まってきており、表流水の汚濁は公共用水域の水質汚濁として社会的により深刻な問題となってきている。それに伴い表流水を水源とする水道水では安全でおいしい水の供給を確保するため浄水処理の高度化のみならず、水道水源の水質保全も重要な課題となってきている。

特に河川、湖沼のような地表水を水源としている我々に最も身近な水道事業への影響は、水質汚濁の進行によって、貯水池における硫酸銅、浄水場における塩素、凝集剤、凝集補助剤等の薬品使用量の増加をもたらす。特にアンモニアと有機物濃度が高い場合には、それに対応した塩素処理の結果、発ガン性物質であるトリハロメタンが生成される。また、プランクトン生産力が高まるに従い、繁殖する生物相にも変化が生じて、異臭味の原因となるらん藻類が殖え、水道にとって安全でおいしい水の供給ができなくなることすらある。したがって、水道水源となる湖沼、河川等の水質が汚濁されるということは、水道事業にとって浄水操作等の費用の増大をもたらす。場合によっては施設の改築を必要とするのみならず、著しく水質汚濁の進行した河川等はもはや水源として利用することを不可能とし、水道水源の涸渇を招来することすら起こりかねない。さらに水質汚濁の進行は水道以外に漁業、農業、レクリエーションにも悪影響を与えている。いままで一般的に富栄養化に伴う水質汚濁といえば、湖沼、湾、沿岸域または大河川等を対象としている場合がほとんどであり、かなりの水量をもつ内陸水、または閉鎖性海域を対象としていた。しかしこれら水域の汚濁の原因は多くの小河川や都市排水路などから流入する汚濁水の集積が引き金になっていることは事

実である。このように、富栄養化による水域の水質汚濁が問題となっている社会情勢を考えれば、水域の富栄養化防止対策を効果的に実施することは焦眉の急を要する課題であり、このためには、富栄養化の制限栄養物である窒素・リンの挙動を把握する必要がある。

本研究は、水域が本来もっている自然の浄化力を再確認し、河川の自浄作用のなかで従来見落とされてきた窒素の挙動を中心に、窒素、リンが河川特に浅い都市河川でどのような現象によって蓄積または浄化されていくかを明らかにすることを目的としている。このため、疑似現場実験と現場実験を通じ、窒素の挙動に対する河川水と河床の役割を検討した。また、河床の影響として自浄作用側のみを扱ったこれまでの研究に加え、アンモニアの溶出という自濁側も合わせて検討した、さらに、それらが河川管理上最も重要とされてきた溶存酸素収支に与える影響について、数値シミュレーションを通して考察した。

本論文は以下の7章から構成されている。

第1章「総論」では本論文の研究背景と目的及び研究内容の概略について述べた。

第2章「河川の水質汚濁と窒素・リンの挙動に関する既往の研究」では、河川の水質汚濁、自浄作用についての既往の研究を述べ、富栄養化の原因物質とされている窒素とリンの水域での挙動に関する既往の研究を整理した。

第3章「河川における疑似現場実験による窒素・リンの挙動」では、富栄養化との係わりの深い窒素、リンが都市河川でどのような挙動を示すかを知るために、疑似現場実験を行い、河川表流水に含まれるSSと河床の役割及びその変化特性について考察した。その結果、阿武隈川のような大きく深い河川においては、梅田川のような都市小河川に比べ流水中の $\text{NH}_4\text{-N}$ の減少にはSSの果たす役割が大きいことがわかった。また河床礫付着生物膜を用いた疑似現場実験から、梅田川の河床礫生物膜による硝化は $0.1\text{mg}/\ell$ 以下になると見かけ上ほとんど進行しないこと、明条件下 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度減少の約15%は付着藻類の摂取によるが、 $\text{NO}_x\text{-N}$ の減少量の14%は脱窒によるものと推測できたこと、河川水中の $\text{NO}_x\text{-N}$ は、硝化からの供給、付着藻類の摂取、脱窒の3つのフラックスを水温、pH、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度から考察することで全体の収支を予測できることなどがわかった。河床が礫で覆われた浅い都市河川ではリンの挙動に及ぼす光合成の影響が大きいこと、pH7.5~8.5の範囲では光条件の有無に拘らず、好気性微生物によるリンの摂取が大きく、pH9.5以上では摂取量は急激に減少し、むしろ溶出してくることが確認できた。さらに、梅田川のような河床が礫で覆われ、比較的SSの少ない浅い河川の水質モデルを考えていくためには、河床礫付着生物を主要因として扱えば、第一次近似的に十分現象を把握できることが示された。

第4章「現場実験による河川水中の窒素・リンの挙動」では、実際河川、すなわち、河床が礫で覆われた仙台市を流れる代表的な都市河川梅田川で現場実験を行い、窒素、リンの挙動を調べ疑似現場実験の結果と比較し、窒素変換過程やその速度論的考察及び流下に伴うリンの変化へ働く諸因子について考察した。2回の調査実験から、河床が礫で覆われた浅い都市河川での無機窒素の変化は懸濁物質を含む河川水自身に認められたような $\text{NH}_4\text{-N}$ の硝化に伴う $\text{NO}_x\text{-N}$ の増加は認められなかった。このような小河川では $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は全体的に減少の傾向を示し、特に $\text{NO}_3\text{-N}$ は流下に伴い昼間、夜間ともに減少し、昼間はその減少量が夜間より大きくなった。

これは昼間では脱窒と付着藻類の摂取の双方が同時に起こっていたことに起因する。 PO_4-P の挙動も昼間、夜間で異なっていたが、これには光合成の影響が関与していたと思われる。梅田川の調査を通して現場から確認できた水質の特徴としては、 NH_4-N の減少下限値は $0.1\text{mg}/\ell$ あたりにあり、これは擬似現場実験の結果とよく一致していた。また昼間においてpHは下流では常に上流より1~2高かった。これは水深が比較的浅く、河床が礫で覆われたSt.A~St.Cの間に認められた光合成による影響と考えられる。

第5章「河床礫付着生物膜からのアンモニア溶出」では、擬似現場実験と現場実験の結果を踏まえて、河床礫付着生物膜からの NH_4-N 溶出について考察し、正味の硝化反応と見かけの硝化反応の違いについて検討した。浅い都市河川では窒素の挙動に与える河床礫付着生物膜の役割が大きいことから、硝化抑制剤を添加した室内実験により、河床礫付着生物膜からの NH_4-N 溶出は時間に比例して増加することがわかった。河床礫生物膜の違いによって溶出速度は大きく異なり、本実験の範囲では河床からの真の単位時間単位礫面積当たりの NH_4-N の溶出速度はそれぞれA礫について $2.0\sim 2.6(\text{mg}/\text{hour}/\text{m}^2)$ 、B礫では $3.6\sim 5.8(\text{mg}/\text{hour}/\text{m}^2)$ であった。また河床礫付着生物膜からの NH_4-N の溶出は河川における窒素の硝化・脱窒ないし全体の挙動に大きな影響を与えることが示された。溶出してきた NH_4-N は河川水中の NH_4-N とともにN-BODとなり、河川の溶存酸素消費モデルにも著しく影響することが示唆された。

第6章「溶存酸素モデルによるN-BODの影響」では、河川水中のアンモニアと河床礫付着生物膜からの NH_4-N 溶出がBODと河川自浄作用にどのような影響を与えるかについて検討した。水質汚濁の進んだ浅い河川においては窒素などの栄養塩濃度が高く、また河床付着物に生息する硝化細菌が多いため、これらが河川DO収支に大きく影響することが考えられる。本章はStreeter-Phelpsモデルに基づき、N-BODを新たに加えたモデルを検討した。モデルに用いた係数は今まで行なってきた、実験値の中から選び、正当性を検討した後、DOシミュレーションを行った。本研究の中で述べてきたように河床からの NH_4-N 溶出を考えた正味の NH_4-N 濃度はかなり大きくなる。そのような条件下で、DO挙動に与える NH_4-N 濃度と硝化速度係数 K_n の影響を評価したところ、 K_n のDO挙動に及ぼす影響は脱酸素係数 K_1 の変化と同様に大きいことが示された。また河床礫付着生物膜からの NH_4-N 溶出が河川水中の NH_4-N 濃度を高めている河川（例えば梅田川のような河川）では、 NH_4-N 濃度のDO挙動に及ぼす影響はBODの変化より大きいことがわかった。なお、全ての要因の中で、DO収支に与える再ばつき係数 K_2 の影響が最も大きく、流れが急で K_2 が $0.48/\text{day}$ 以上であればBOD $20\text{mg}/\ell$ 、 NH_4-N 濃度 $3\text{mg}/\ell$ というかなり高い汚濁負荷を受けた河川であっても常に好気条件下に保てることが示唆された。

第7章「総括及び結論」では、各章で得られた主な結論を総括した。

審査結果の要旨

本論文は実河川の河床礫を用い、河床礫付着生物膜からの $\text{NH}_4\text{-N}$ の溶出並びに硝化と脱窒に関して考察するとともに、河川 DO モデルに及ぼす硝化性 BOD の影響を検討したもので、全編 7 章からなる。

第 1 章では本論文の研究背景と目的及び研究内容の概略について述べている。

第 2 章では、河川の水質汚濁及び自浄作用についての既往の研究を述べ、富栄養化の原因物質とされている窒素とリンの水域での挙動に関する既往の研究を整理している。

第 3 章は、都市河川中の窒素とリンの挙動を河川表流水に含まれる浮遊物質 (SS) と河床の役割及びその変化特性から考察したものである。その結果、阿武隈川のような大きな河川においては、流水中の $\text{NH}_4\text{-N}$ の減少には SS の果す役割が大きいこと、梅田川のような小さな都市河川の河床礫生物膜による硝化は $\text{NH}_4\text{-N}$ $0.1\text{mg}/\ell$ 以下になると見かけ上ほとんど進行しないこと、リンの挙動に及ぼす光合成の影響が大きいこと、pH 7.5~8.5 の範囲では光条件の有無に拘らず好気性微生物によるリンの摂取が大きく、pH 9.5 以上では摂取量は急激に減少しむしろ溶出してくるなどを明らかにしている。これらは有用な知見である。

第 4 章では、河床礫付着生物が河川の水質を左右する主要因となっている梅田川において窒素の挙動について検討している。河川水中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は全体的に流下に伴い、昼間、夜間とも減少するが、昼間はその量が夜間より大きくなり、この理由は昼間では脱窒と付着生物への摂取の双方が同時に生ずることに起因すると述べている。

第 5 章では、河床礫付着生物膜からの $\text{NH}_4\text{-N}$ の溶出について考察し、正味の硝化反応と見かけの硝化反応の違いについて検討している。河床礫付着生物膜の違いによって溶出速度は大きく異なり、生物膜からの $\text{NH}_4\text{-N}$ の溶出は時間に比例して増加すること、また $\text{NH}_4\text{-N}$ の溶出は河川における窒素の硝化・脱窒など全体の挙動に大きな影響を与えることを示している。これらも有用な知見である。

第 6 章では、河川水中の $\text{NH}_4\text{-N}$ が BOD や河川自浄作用にどのような影響を与えるかについて検討している。硝化速度係数 K_n の溶存酸素 (DO) に及ぼす影響は脱酸素係数 K_1 の変化と同様に大きく $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の DO に及ぼす影響は BOD の変化より大きい。また全ての要因の中で、再ばっき係数 K_2 の DO に及ぼす影響が最も大きく、流れが急で K_2 が $0.48/\text{day}$ 以上であれば BOD $20\text{mg}/\ell$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ $3\text{mg}/\ell$ というかなり高い汚濁負荷を受けた河川であっても常に好気条件下に保てることを示唆している。これらは重要な知見である。

第 7 章は結論である。

以上要するに本論文は、都市河川における窒素の挙動について考察し、河川水と河床の役割及び河床からの $\text{NH}_4\text{-N}$ の溶出を明らかにするとともに、溶出してきた $\text{NH}_4\text{-N}$ が BOD に大きく影響することを示したもので、衛生工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。