

学位論文題名

砂ろ過の生物化学的機能の評価に関する基礎的研究

学位論文内容の要旨

緩速ろ過法は、低濃度の懸濁・溶解性成分や細菌の除去などに関し、歴史的な実績を持ったシステムである。過去、砂層表面に形成される生物ろ膜（schmutzdecke）の機能を中心に多くの研究も行われてきた。しかし、その低速性と近年の水源汚濁の進行のため、前塩素処理を前提とした急速ろ過システムにとって代わられた。一方、現行の急速ろ過は懸濁成分除去の最終仕上げ過程としてのみ位置づけられ、生物化学的な除去能はまったく期待されていない。しかし、急速ろ過池における硝化の可能性を示唆した報告はあり、急速ろ過にも緩速ろ過のような生物化学的機能を付加しうるものと予想される。そこで本研究では、溶解性成分に対する緩速ろ過の生物化学的機能を再評価し、その機能を急速ろ過に付加して高速化することの可能性を探り、その実用化に向けた工学的な検討を行った。本論文は5章から構成されている。

第1章は序論であり、本研究の主題、目的、手順について述べた。文献調査の結果、本研究の主題と目的を明確かつ工学的に扱った研究例は極めて少ないことを示した。

第2章では、緩速ろ過の生物化学的機能を詳細に評価することを目的に実験的な検討を行った。対象を低濃度の溶解性成分にしぼり、砂層内の基質濃度分布（除去プロファイル）の変化過程に重点をおいて評価した。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ とグルコースに関しては、両者の競合関係に関して検討を加えた。その結果、緩速ろ過は低濃度の溶解性成分に対して広汎な対処能力を有しており、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、グルコース、マンガンを生物化学的に除去しうることを確認した。また、仮に損失水頭の増加を無視すれば、数10m/日のろ過速度でも除去が可能であることを明らかにした。さらに、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ とグルコースの低濃度共存系では競合がほとんどないこと、色度成分は緩速ろ過ではほとんど除去されないことを示した。

除去速度とその砂層内分布の結果より、除去機構としては砂層表面と内部の細菌・微生物による生物化学的機能が重要である。ただし、溶解成分を対象とする場合、砂層全体が生物化学的機能を発揮する場になりうること、微生物量はあくまでも流入基質負荷に支配され、これとバランスを取りながら砂層内分布を形成し増殖してゆくことが本研究の重要な結論である。表面の生物ろ膜がすべてという通説は、溶解性成分に対する緩速ろ過の機能を正確に表現していない。生物ろ膜とは、あくまでも砂層内での除去プロファイル発達過程の最終段階の呼称であり、基質濃度の高い表層部ほど微生物が増殖し、次第に表層部卓越型の除去になるという一連の過程の結果である。なお、緩速ろ過で5mm程度のかき取りを行っても $\text{NH}_4^+\text{-N}$ の硝化にはほとんど影響がない。これは、砂層の表層のやや下にも硝化菌が存在するからであり、上記の結論と一致する。以上より、砂ろ過により溶解成分を除去しようとする場合、緩速ろ過が持つ生物化学的機能を高速化することは充分可能であり急速ろ過化にもその機能を付加しうるものが予測された。

第3章では、急速ろ過の生物化学的な機能について、実現と高速化の可能性、実際上の諸問題に対する応答性に関して実験的に検討した。対象を低濃度系の硝化にしぼり、砂層内除去プロファイルと硝化速度の変化過程を詳細に検討した。その結果、急速ろ過でも充分

な硝化が起こり、上述の除去プロフィルの発達過程が鮮明に確認された。また、濁質やマイクロブロック添加の影響はないことを確認した。急速ろ過の生物化学的機能は、緩速ろ過のそれと本質的にほぼ等しいと言える。違いは、ろ過速度が大きいため定常への移行過程が長くなるだけである。硝化速度の砂層内分布の結果から、急速ろ過の微生物量は緩速ろ過のそれに比べて最終的に10~100倍と推定された。ろ過速度が大で流入負荷が大きくても、長期的には微生物がこれに対応して増殖・追隨してゆくことが明らかとなった。

実用上の問題として、水温と原水濃度の急変動や逆洗の影響も検討した。水温については、季節変動と日周期変動に充分追隨できる結果を得、低水温に関しては3~5℃で40日間の硝化運転の実績を得た。生物膜内の固着性細菌は活性汚泥等の浮遊性細菌に比べて温度耐性があるものと考えられる。逆洗については、当初は大きな影響が出るが、繰り返し逆洗を行ってゆくと影響がほとんど無くなることを見いだした。逆洗により砂層内の除去プロフィルが全層型に移行するためと考えられる。なお、原水濃度の急変動の影響は大きく、なんらかの対策が必要となった。以上より、緩速ろ過と急速ろ過は、砂層の生物化学的機能という観点からは本質的に等しい。緩速ろ過が持つ各種溶解性成分に対する生物化学的機能を急速ろ過に付加し、高速化をはかることは充分可能と考えられる。

第4章では、砂ろ過の生物化学的機能をモデルにより評価し、非定常変動への対策や最適設計・運転の指針を提示することとした。このために、まず逆洗をとまなう固定層の非定常生物膜モデルを提案した。Rittmannの非定常フラックスモデルをもとに、生物膜の剪断剥離と水温変動の取り扱いを一部修正し、さらに逆洗モデルを考案付加したものである。シミュレーションの結果、上述の除去プロフィル発達の状況が再現でき、実験との対比によりモデルの妥当性を確認した。

シミュレーションを多数行って各種非定常変動の影響を検討した結果、実用上問題となるのは原水濃度の急変動であり、第3章の実験結果と一致した。対策としては、予め原水に基質を添加して運転する方法が考えられ、計算と実験により効果を確認した。逆洗に関しては、当初は生物膜が剪断剥離して処理水質が悪化することを確認した。しかし、定期的な逆洗を繰り返すことにより生物膜が再度発達して影響がほとんどなくなる結果となった。むしろ、逆洗により砂層内の生物膜分布が全層卓越型になり、 S_{min} 問題を克服できること、非定常変動への対応が若干有利になることなどの利点もあることを示した。通常の急速ろ過における強度と頻度で逆洗をしてほぼ問題がないと考えられる。

ろ材径、砂層空隙率、砂層深、ろ過速度といった物理的諸元についてもシミュレーションにより検討を加えた。通常の範囲内で値の組合せを様々に変えて計算したが、結果に大差はなく、砂層の諸元には最適値といったものが存在しない。これは、物理的諸元で定まる流入負荷量に対応した形で微生物が増殖して生物膜が発達し、逆洗による全層卓越型への移行効果も加わって、最終的に基質を消費してしまうからである。したがって、現行の急速ろ過の設計・運転条件で十分な生物化学的機能を期待できる。

以上、本研究の結果から、固液分離の最終仕上げとしてのみ位置づけられてきた急速ろ過に、前塩素処理の廃止を前提として微生物学的機能を付加することは可能である。しかも、その場合、現行の施設と運転方式に大幅な変更を加える必要はない。したがって、本方式を浄水処理システム内に様々な形で組み込み、各種溶解性成分の生物学的除去に利用することが可能である。例えば、1)現行の急速ろ過システムのフローを不変とし、急速ろ過池にある種の生物学的馴養を施した後に運転する方法、2)急速ろ過システムの後に高速化した緩速ろ過池を設けて同様に馴養後運転する方法などが考えられる。

第5章は総括であり、本研究で得られた結果をまとめた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 丹 保 憲 仁

副 査 教 授 渡 辺 義 公

副 査 教 授 高 桑 哲 男

副 査 教 授 田 中 信 壽

学 位 論 文 題 名

砂ろ過の生物化学的機能の評価に関する基礎的研究

本論文は、濁質の除去を目的として運用されてきた従来の緩速ろ過池について、生物ろ過膜とろ床での好気性生物酸化の機能を積極的に評価して、多様な溶解性成分の制御に安定的に機能することを示したものである。

研究の具体的な成果を挙げれば次のようである。

(1)緩速ろ過が持つ生物化学機能を詳細に見直すために、低濁度系の NH_4^+ 、マンガン、糖類等々の各種溶解性成分を対象として、単様、結合のさまざまな存在状態に対する検討を行い、糖類等の低分子生物易分解性有機物の酸化分解とアンモニアの硝化には競合関係はなく、酸素制約の状態にない場合には、並行的に共に除かれることを示すとともに、砂層表面の生物膜のみならずろ床深部にいたるまでこれらの作用が活発に機能することを明らかにした。また、10倍以上のろ過速度を持つ急速ろ過池においても、有効な硝化反応が期待できることを明らかにし、古典的な緩速ろ過の10倍程度の数十 m/日のろ過速度で運用する生物ろ過池の可能性を示した。

(2)水質、基質濃度、ろ過速度、ろ床の逆洗条件などの操作因子に対応した、ろ床内での生物化学的酸化反応を明らかにするために、低基質濃度に対応する好気性生物膜モデルとして、Rittmannの非定常フラックスモデルを大きく発展させて、ろ床内における洗浄時の生物膜の剥離と水温の変動を考慮にいたった新しい動力学モデルを提案し、現象の動的な記述を可能にした。また、その妥当性を多くの実験により確認し、諸係数を評価した。

(3)これらの成果を基にして、さまざまな原水条件と操作条件の下でのろ過池における生物化学反応のシミュレーションを行い、溶解性成分処理のためのろ過システムの適切な設計運用条件を提案した。

これを要するに、本論文は、古典的な緩速砂ろ過法を近年の水環境条件の変化に対応させる溶解性成分処理プロセスとして運用するための新しい考え方を示し、その論拠を明らかにした上で、対応の方策を提示したもので、衛生工学、環境工学の進歩に寄与すること大である。

よって、著者は北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。