

氏名	丁 國 際
授与学位	博士（工学）
学位授与年月日	平成8年3月26日
学位授与の根拠法規	学位規則第4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	浄水処理における微小動物の制御に関する研究
指導教官	東北大学教授 須藤 隆一
論文審査委員	東北大学教授 須藤 隆一 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

水道は人間の生命維持に欠くことのできない物質である水を供給するとともに、水に関係の深い水系伝染病の防御に重要な役割を果たしてきた。水道の発達は「生活水準の尺度」いえる。日本では、水道は高普及時代を迎え、その普及率は平成5年度末で95.3%となり、前年度より0.2%の伸びを示し、多くの人がなに不自由もなく水道を利用できる状態にある。一方、近年水道水の水質に対する利用者の関心は極めて高く、異臭味、消毒副生成物および農薬等の微量化学物質の混入などの問題が大きく取り上げられるようになった。それにともない水道水質の安全性に対する不安感が増大し家庭用浄水器やボトルウォーターの急速な普及が見られ、水道の安全性に対する信頼が低下している。そこで水道事業体では、新たに高度浄水処理と呼ばれる浄水処理技術を導入し、これらの問題に対応してきた。

高度浄水処理は、通常の浄水方法である凝集沈殿、急速ろ過などでは十分対応できないトリハロメタン前駆物質、異臭味物質および微量化学物質などの溶解性有機汚濁物質を対象として、オゾン処理、活性炭処理などによる低減化を図るものである。オゾンはその強力な酸化力で、有機汚濁物質の分解を行い、活性炭は吸着作用により、異臭味物質、微量化学物質およびオゾン分解物質の除去に用いられている。この活性炭ろ過槽には、微小動物を含む多種類の微生物が生息し、特に生物活性炭と呼ばれる活性炭の利用方法では、微生物は活性炭の吸着機能を延ばすと共に活性炭には吸着されないアンモニアを除去するなどの役割も果たしている。しかし、この有用な微小動物の出現により新たな問題が生じてきた。ヨーロッパおよび日本において、活性炭ろ過層から線虫類や輪虫類などの微小後生動物が漏出していることが報告され、オゾン・活性炭ろ過処理ではある程度共通の事象であることが指摘されている。

水道水には、その基本的な理念として人体に無害であること、使用上の不便がないこと、不快感がないことが求められており、これは昔も今も変わりはない。水道水に漏出する微小動物が消毒処理により不活化されていても、利用者には不快感をもたらす恐れがある。また、微小動物の内、線虫類は消毒で用いられる塩素に比較的抵抗性があるとされている。このまま容認していれば、水道水になんらかの悪影響が生じる可能性もある。高度浄水処理が必要不可欠な技術としてますます導入される現在、浄水処理における微小動物の制御は水道水の安全性に直結する問題として緊急に解決すべき課題であると考えられる。

そこで、本研究は、水道水および浄水処理プロセスにおける微小動物の出現状況とその挙動の把握、微小動物の培養方法の確立、消毒における線虫類とその体内細菌との関係の解明、さらに線虫類を制御する技術手法の確立とモデルの

作成を目的とする。

本論文は以下の内容で7章から構成されている。

第1章「総論」では本研究を行うに至った背景および論文構成について述べている。

第2章「水道施設における微小動物の出現に関する既往の研究」では水道施設における微小動物の出現に関して文献調査を行い、微小動物の出現の現状とその衛生学的意義をまとめ、本研究を行う必要性および研究課題について整理を行っている。

第3章「水道水及び浄水場における微小動物の種類と現存量」では水道水中に存在している微小動物の汚染の実態を把握し、微小動物の発生源を究明することを目的として、水道水および各浄水プロセスにおける微小動物の種類、個体数およびその関連因子について検討を行った。

高度処理を行っている浄水場で処理され通常の残留塩素濃度が維持されている水道水においては、線虫類 (Nematoda) 3属4種類、輪虫類 (Rotatoria) 3属2種類、繊毛虫類 (Ciliata) 3族3種類、アメーバ類 (Rhizopodea) 2属2種類、緩歩動物 (Tardigrada), ミズダニ類 (Hydracarina) がそれぞれ1属1種類の計14種類の生存する微小動物が水道水から観察された。死亡した微小動物についてはムカシエビ類が1種類だけ確認された。水道水から検出された微小動物はその個体数によって出現頻度の高い輪虫類と線虫類、時々出現したミズダニ類、ムカシエビ類と緩歩動物、偶に検出された繊毛虫類とアメーバ類という三つのグループに分けられることが明らかとなった。線虫類及び輪虫類は年間を通して水道水に出現し、個体数の消長は、降雨量との関連性が認められなかったが、水温と強い関連性が認められた。死亡した微小動物の個体数については輪虫類が最も多かったが、生存するものについては線虫類が最も多いことが確認された。水道水における微小動物の種類と個体数は季節的に変化することが確認された。線虫類の種類は、ほとんど2属だけ検出され、そのうち、*Rhabditis* は主に冬季に、また *Plectus* は通年、高い割合で出現した。このことから、水道水中に出現している線虫類の個体数の季節変化は、主に *Plectus* の季節変化によるものであることがわかった。要するに衛生学的な観点からみると線虫類は最も注視すべき微小動物と考えられた。

また、水道原水中の微小動物は、浄水処理プロセスにおいて、前塩素処理、沈殿処理および砂ろ過処理で除去されるが、生物膜処理と活性炭処理で増加し、とくに輪虫類と線虫類が著しく増加することが確認された。微小動物、とくに線虫類の種類、体長、個体数および生存率などの季節変化の特徴を総合的に検討したところ、浄水処理によっても線虫類は完全に除去されず、とくに活性炭処理が水道水虫の線虫類の重要な発生源であると考えられた。

第4章「水道水から分離された微小動物の培養及び増殖特性」では水道水及び浄水場における微小動物の挙動を明らかにした上で、更なる研究を進めるために水道水から分離された微小動物、とくに線虫類に着目した培養方法の確立を目指すLE培地の開発研究について述べ、この培養方法を用いて線虫類の増殖特性に及ぼす影響因子を実験的に検討した。

水道水から分離された線虫類の培養において、線虫類の培養に一般的に使われるNGM寒天培地、sloppy寒天培地および栄養寒天培地では培養ができず、LE培地のみ培養が成功した。LE培地は、水道水中から分離された微小動物の培地として、線虫類だけではなく、ミズダニ類、繊毛虫類、輪虫類にも良好な培地であることが明らかになった。線虫類の継代培養、すなわち、植継は水道水から分離した線虫類の初代培養と比べ簡単であり、継代培養に要する基本的な条件は、栄養成分の要求が低く水道水で十分であるが、餌とする細菌が必要であることが明らかとなった。

培養方法を確立したことで、線虫類の形態の測定が可能になり、水道水から検出される線虫類の体長はいずれも約1mmであることが分かった。線虫類 *Plectus* sp. 雌雄同体の個体のみによって、また、*Rhabditis* sp. は雌のみによって

増殖が可能であることがわかった。*Plectus* sp. は、*Rhabditis* sp. と比較すると、フロック状に付着し生活することが特徴であり、このような付着性を持つことが浄水処理プロセスに定着し、増殖する可能性を高めるものと推察された。*Plectus* sp. と *Rhabditis* sp. の増殖はともに中温域では増殖可能で、いずれも約 5℃以下では増殖ができず、35℃以上では増殖が困難になり、20℃付近で最も速いことがわかった。最適 pH 値は、*Plectus* sp. と *Rhabditis* sp. と同じく pH 6 付近であったが、*Rhabditis* sp. はより広い pH に適応することがわかった。線虫類は、他の微小動物と混合培養の場合、食物源の競争のため、比増殖速度が低下することが認められた。

また、餌としての細菌濃度は、線虫類に増殖に大きく影響を与えることがわかり、*Plectus* sp. は、*Rhabditis* sp. と比べ、低い細菌濃度の環境においても、長期間生存が可能であった。このことは、実際の水道水虫から検出された線虫類の優占種が、*Rhabditis* sp. ではなく、*Plectus* sp. であることの一因と推定できた。

第 5 章「細菌消毒に及ぼす線虫類の影響」では水道水から分離された線虫類を用いて、まず線虫類の体内の細菌を測定する手法の確立のために、線虫類の体内細菌を調査し、体内細菌の消毒に及ぼす線虫類の影響を定量的に検討し、水道水に漏出する線虫類の衛生学的意義について考察を加えた。

超音波処理法を用いて線虫類の体内細胞を測定する手法は効果的であり、超音波処理条件によって生菌数が変化し、最適超音波処理条件は処理時間 60 秒、出力 40w であった。塩素処理による線虫類の体内細菌の生存率は、同一の消毒条件の場合の細菌の生存率と比べて著しく高くなり、また塩素添加濃度の増加および接触時間の延長とともに低下する傾向が見られるものの塩素処理の効果は十分ではないことが明らかになった。線虫類の体内細菌を対象として殺菌を行う上では、塩素に比較して、殺菌能のより強いオゾンを活用することが極めて効率的であることが明らかになった。線虫類の生存率と体内細菌の生存率の間に高い正の相関関係あり、細菌の生存率を低減させるためには、線虫類の生存率を低減することが有効であることがわかった。実際の水道水から分離された線虫類を対象とした調査により、とくに生存線虫類の体内には多数の生菌が保持され水道水に漏出していることが明らかになった。

第 6 章「浄水処理における微小動物の制御」では第 2 章、第 3 章、第 4 章および第 5 章の知見を考慮し、微小動物の制御手法を確立するために、水道水から検出頻度の高い線虫類を研究対象とし、塩素およびオゾンによる不活化効果を実験的に検討した。さらに不活化効果を反映可能な統計的モデルの作成と評価を行った。

オゾンは線虫類に対し、実用可能な濃度と接触時間の範囲で、塩素処理に比べ高い不活化効果が認められた。したがって、水道水中の微小動物を制御するには、オゾン処理が有効であることが示された。

線虫類の不活化結果に関する温度、塩素濃度および接触時間の相互関係を表すために Hom 式と Arrhenius 式を合わせたモデルを作成した。このモデルを用いて、上記の因子を総合的に考慮し最適な不活化条件を選ぶことが可能となった。モデルを用いて分析した結果、塩素を用いた場合、不活化率の上昇に対し、塩素濃度の増加が、接触時間の増加より効果的である。また、オゾン攪拌実験系では、塩素添加実験系と比較すると、接触時間の増加の効果も大きいことがわかった。

第 7 章「総括および展望」では各章で得られた知見を要約し、浄水処理における微小動物の制御に関して今後の課題および展望を含めて総括した。

審査結果の要旨

近年、水道水源の汚濁が進行する一方、利用者からの安全でおいしい水道水の要望が高まり、水道水質基準が強化されるとともに、高度浄水処理技術が導入されるようになった。生物活性炭処理をはじめとする高度浄水処理は、多種多様の混合微生物群集を用いることが多いため、これらの微生物や微小動物が水道水に漏出する可能性がある。

本論文は、水道水および浄水処理プロセスにおける微小動物の出現状況、培養方法、その体内に存在する細菌の検出、消毒効果を検討した成果を取りまとめたもので、全編7章より構成される。

第1章は総論である。

第2章では、水道施設における微小動物の出現に関する研究の現況およびその衛生学的意義をまとめ、本研究を行う必要性及び研究課題について示している。

第3章では、水道水中に、線虫類、ミズダニ類、ワムシ類、繊毛虫類、下毛類などの微小動物が生存していること、線虫類は生存個体数が最も多く、年間を通して出現したこと、微小動物は浄水処理プロセスにおいて、生物膜処理と活性炭処理で増加し、とくにワムシ類と線虫類が著しく増加すること等を明らかにした。これらは有用な知見である。

第4章では、水道水から分離した微小動物の培養及び増殖特性について実験し、線虫類、ワムシ類、ミズダニ類などをLE培地を用いて培養に成功したことを示している。また、最も出現頻度の高い線虫類の最適培養条件と増殖の環境条件を明らかにするとともに、季節的消長に与える生態学的要因について検討している。これはきわめて有用な成果である。

第5章では、超音波処理法による線虫類の体内細菌を測定する手法を開発し、生存線虫類体内には多数の生菌が保持されていることを示している。また線虫類の生存率と体内細菌の生存率の間に高い相関があることを認めている。これらは興味深い知見である。

第6章では、塩素及びオゾンによる微小動物の不活化効果を検討し、オゾンは線虫類に対し塩素処理より高い不活化効果を認めている。さらに線虫類の不活化効果と温度、塩素濃度及び接触時間との相互関係を表すモデルを作成し、最適不活化条件の決定を可能にしている。これらは重要な成果である。

第7章は総括および展望である。

以上要するに本論文は、水道水中及び浄水処理プロセスにおける微小動物の出現状況、培養方法、その体内細菌との関係及び制御手法について明らかにしたもので、環境工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。