

氏 名 小越 真佐司  
授与学位 博士(工学)  
学位授与年月日 平成17年 3月 9日  
学位授与の根拠法規 学位規則第4条第2項  
最終学歴 昭和52年3月 神戸大学工学部土木工学科卒業  
学位論文題目 下水の再利用と下水処理の高度化に関する研究  
論文審査委員 主査 東北大学教授 野池 達也 東北大学教授 千田 侑  
東北大学教授 西村 修

## 論文内容要旨

水は循環する資源であり、地球規模の水文循環のほかに表流水の流域単位で見ても繰り返し取水と排水が行なわれている。このような循環利用は、自然発生的に行なわれているもので、そこには何らかの自浄作用が介在して水利用に伴う汚濁の除去が行われている。しかし、人口や産業の集中などによって、質的あるいは量的に需要を賄うに足る水を従来水源から得ることが困難な水需給の逼迫地域が増加し、人為的な手段による汚濁の除去と下排水の再生利用を必要とする地域が増加している。

下排水を再生して利用する試みは、我が国においても、およそ50年前から始まり、現在では製造業における工程廃水の再生循環利用による水使用量の削減や業務ビルにおける水洗用水への利用による上水使用量の削減、修景施設への再生水供給による都市環境の改善など、様々な分野で実用化されている。

我が国の排水の再利用は、当初は、水質その他、法令等による基準は定められて来なかったが、一般的な安全性を保障するため、汚水を含む下排水の再生水用途として最も適切であると考えられる水洗用水に使用する場合の水質基準(案)が、昭和56年度に、旧建設省(現、国土交通省)、旧厚生省(現、厚生労働省)、旧通商産業省(現、経済産業省)との合意に基づいて決定され、現在に至っ

ている。本基準（案）の要点は、残留塩素の保持と大腸菌群数10個/ml以下である。

下水処理水を再生水源として広い区域に再生水を供給する広域循環システムでは、本基準（案）に基づく運用開始直後から、利用先において、再生水の水質に関係すると見られる問題が散発していたが、その原因解明や抜本的対策についての検討は十分に行われてこなかった。その結果、幾つかの施設では問題の解決にあたって再生水の利用を中止する事態に至っている。本論文は下水再生水の供給に関わる問題の原因を明らかにし、再生水利用の存続を可能にする下水処理の高度化による解決手法について述べるものである。

従来 of 下水処理水再利用に関する研究では、再生水中の物質や微生物が、再生水利用者、農作物や土壌あるいは水生生物に及ぼす影響と安全性に焦点があてられており、影響を許容限度内にとどめるための水質およびその水質を達成するための処理の高度化手法が検討されてきた。下水の直接的な再利用は世界的に経験の浅い技術分野である。特に、広域に中水道方式で再生水を供給するシステムは我が国における実施が主であり、海外では極めて限られた地域で実施されているに過ぎない。したがって、本論文において扱った広域循環システムにおける諸問題についての研究事例等は、我が国における問題の報告例等の他には見ることができない。配水管渠システムにおける水質の問題に関しては上水道分野において豊富な研究がなされており、残留塩素消費、腐食に関する諸指標、錆こぶの発生と鉄酸化菌、残存有機物による付着生物膜の生成とその影響など、本論文の対象とした問題と類似の現象が扱われており、原因究明の手法を検討する上で、有益な情報を得ることができた。しかし、再生水とは含有物質の種類や濃度の違いがあり、これらの研究成果から、現象の解明に必要な情報を得ることはできなかった。本論文の意義は、下水処理水の再利用を管渠システムを通じて行うという、先例の少ないシステムで生じた問題について、その原因の究明と抜本的解決手法の呈示を行い、更に、その様な手法の採用によって生じる効果が経済的な優位にもつながる可能性を示したことであり、今後の水再生利用実用化の検討における基礎的知見となり得る点にある。

本論文の内容は次の通り、7章より構成されている。第1章「序論」では、本研究の背景、目的及び全体の構成について述べている。

第2章「水の再利用に関する既往の研究」では、我が国の水の再利用の小史と再利用に関する基準

並びに再利用システムの分類、等基礎的な情報を整理し、我が国の再利用の海外諸国との際だった差異について述べ、その特徴的な再生水の配水管渠システムという場で生じる問題とその研究が持つ意義について述べている。

第3章「下水処理水の閉鎖循環再利用における安全性・快適性の保持」では、再生水の安全性を担保する基準（案）の遵守の実態と、大腸菌群数の増加を抑制する上で必要な残留塩素濃度について述べ、保持濃度の時間変化について温度、水質、初濃度等の影響を検討した結果を述べた。この残留塩素消費反応について残留塩素濃度の反応次数を検討した結果、20℃以上ではほぼ2次反応とみなされるのに対し、15℃では4次以上の高次反応になると見られることから、常温域全般において適用できる減衰予測式は得られないことを述べた。

次に、再生水の快適性を損なう現象の主因が配水・給水施設で生じる付着生物膜であることを述べ、下水処理水の再利用システムでは従属栄養細菌と共にアンモニア酸化細菌等化学独立栄養細菌が付着微生物膜の構成要素であることを明らかにした。また、付着生物膜の存在は残留塩素消費の原因の一つであることを明らかにし、その制御を残留塩素で行うには高い塩素注入率が必要になること、微生物の栄養源となる有機物やケルダール性窒素の濃度を削減することが付着生物量を削減する上で塩素注入率を高めるより効果が高いことを示した。

これらの結果から、現場で残留塩素濃度を管理するために考慮すべき事項としては、水温、移送に要する時間および管渠等の内壁面に付着する生物量であり、付着生物量を制御する有機物濃度やケルダール態窒素濃度であることを述べた。

オゾン処理による有機物の部分分解の効果について検討し、オゾンにより易分解性BODの分解が行われること及び分子量分布の低分子化が生じることを示した。再生水中に残存する有機物の分子量の違いが付着生物膜生成に及ぼす影響を検討した結果、高分子成分を除くと付着生成の始まりが遅れたことから、オゾン処理には若干の付着抑制効果があるものと期待されることを述べた。

第4章「再生水による管路腐食とその対策」では、利用者が再生水利用を中止する直接のきっかけとなった給水設備付近の管渠の閉塞及び給水関係施設の腐食の実態と原因について、現地調査及び室内実験等によって検討を行った。その結果、実際の施設において移送中に再生水中の浮遊性鉄濃度の増加が認められ、それらは主として配水設備で用いられる無防食の大型バルブ等の鉄素材から溶出し

た鉄が残留塩素によって直ちに酸化されて浮遊性の酸化鉄に変わったためであると推定された。

腐食試験片を基いて行った実験では、水温、残留塩素濃度、電気伝導度、が鉄の溶出を促進する因子であり、pH上昇は溶出を抑制する因子であることが判明した。下水再生水は上水に比較すると電気伝導度が高く、有機物濃度が高いことなどから残留塩素消費が早いと高い塩素注入率が必要であることなどから、配水管に用いられる素材からの鉄の腐食が生じやすく、その結果、閉塞の原因となる酸化鉄の供給量が増加し、閉塞現象の発生につながったと推定されることを述べた。3章の結果より、快適性・安全性保持に必要な残留塩素濃度を低い値にするには有機物濃度等付着生物膜の栄養源を削減して供給すれば良いと考えられるので、腐食・閉塞トラブルを防止しながら安全性と快適性を満足させるためには、再生水質を高度化し、有機物濃度やケルダール態窒素濃度を削減して塩素消費を削減することが最も合理的な問題の解消策であると考えられることを述べた。

第5章「膜を利用した下水処理水質高度化と再利用への適用性」では、再生水質高度化手法の一つとして、特に、再利用において重要な水系感染症の病原生物の除去性に優れている膜分離活性汚泥法による水質の高度化と再利用への適用性について検討した。その結果、第一に、嫌気好気法など窒素除去可能な膜分離活性汚泥処理と粉末活性炭添加処理の組み合わせによる高度処理によって、再生水として適当な、低ケルダール性窒素、低有機物の処理水を容易に提供できることを明らかにした。第二に、膜の長期使用耐性実験の結果、ポリオレフィン系中空糸状膜は7年間の使用に対して十分な耐久性を有していることが判明した。但し、実験に用いたモジュールはモジュールとしての耐用期間が短く、実用にあたってはモジュールの強化が必要であることが判明した。

室内実験での確認事項に基づき、民間企業との共同研究で実証実験を行い、室内実験の結果よりも一層の処理の安定化と高度な窒素除去が可能であることを明らかにした。他方、膜の目詰まりによるフラックスの低下が生じるので、膜分離活性汚泥法の実用化にあたっては洗浄方法の改善・開発と共に室内実験で採用したような低フラックスでの使用も考慮する必要があると考えられた。また、細菌の通過が可能な異常孔を作らない製膜技術や膜面を傷つけない現場管理方法などが、膜分離活性汚泥法の実用性を高めるための今後の技術開発課題であることを述べた。

第6章「閉鎖系循環利用の経済性」においては、実施設の調査結果に基づく建設並びに維持管理費の分析を行って、再生水を得るための再生処理の原価を明らかにした。管渠システムのコストについ

てはモデル区域を設定して積算によって推定し、規模効果や利用率の影響を加味して再生水原価を推定した。これらの結果を総合して再生水原価を推定し、全国平均の水道原価と比較したところ、昼間人口密度が1000人/haを上回る業務地区では膜分離処理などの高度な処理を行っても、水道原価を下回ることを示した。さらに、水質が低いと腐食・閉塞の問題が生じることを加味した推定の結果、高度な再生水質を得る方が、再生水コストは低くなり、再生水質の高度化が再生水利用システムの問題解決の最も優れた対応策であることを述べた。

第7章「総括並びに結論」では、本研究を通して得られた成果を総括した。

## 論文審査結果の要旨

下水処理水を再生水資源として広範な区域に供給する広域循環システムでは、再生水の水質に関係した問題が生じているが、その原因解明や対策についての検討は十分に行われてきていない。本論文は、下水再生水の供給に関わる問題点を明らかにし、再生水利用の存続を可能にするための下水処理の高度化について検討したもので、全編7章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景および目的について述べている。

第2章では、わが国における下水処理水の再利用に関する基準および再利用システム、諸外国との差異および再生水の配水管システムにおいて生じた問題点等について文献調査を行い、研究課題の整理を行っている。

第3章では、再生水の安全性を担保する残留塩素濃度に及ぼす温度、水質、初濃度の影響について検討し、残留塩素消費反応の反応次数については、常温域全般において適用できる減衰予測式は得られないこと、また、オゾン処理によって、易分解性 BOD の分解および分子量分布の低分子化が行われ、付着微生物を抑制する効果があることを明らかにしている。これらは重要な知見である。

第4章では、再生水給水設備の腐食原因として、残留塩素による無防食鉄素材の酸化にあることを、現地調査および室内実験によって明らかにし、残留塩素濃度を低く保持するためには、付着微生物膜を増大させないために栄養源の低い再生水を供給する必要性を提示している。これらは新しい知見である。

第5章では、膜分離活性汚泥法による処理水質の高度化と再利用への適用性について検討し、嫌気好気法など窒素除去機能を有する膜分離活性汚泥処理と粉末活性炭添加処理の組み合わせによる高度処理プロセスを提案している。これらは有用な知見である。

第6章では、実施設の調査結果に基づき、建設並びに維持管理費の分析を行い、再生水を得るための処理原価を推定し、昼間人口密度が 1000 人/ha を上回る業務地区では膜分離処理を行っても、全国平均の水道原価を下回る結果を得ている。再生水質の高度化は、低い水質の再生水による腐食・閉塞の問題が生じることを加味することにより、再利用システムの問題解決のための優れた対応策であることを示している。

これらも有用な知見である。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、再生水供給管渠系における諸問題の原因を究明し、水質向上のための抜本的対策を示すと共に、再生水利用の経済性の評価を行ったもので、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。