

(様式第 13 号)

## 学 位 論 文 要 旨

氏名: 佐藤敏雄

題目: 中東および北アフリカ地域における都市下水の農業用水資源としての有用性と長期都市下水灌漑の環境影響評価に関する研究

(Studies on Wastewater as an Irrigation Water Resource and the Effect of Long-term Application on the Environment in Middle East and North African Regions)

本研究では、乾燥地における都市下水の安全な農業利用を確立する一助とするため、乾燥地における都市下水の灌漑利用の有用性を量的および質的な観点から評価した。そのため、世界の都市下水の潜在的な有用性および現状の動向を量的な観点からの把握、並びに淡水資源がひっ迫し都市下水灌漑の重要性が今後高まる中東および北アフリカ地域における都市下水長期灌漑農地の環境影響評価を行った。

### 1. 世界と中東および北アフリカ地域における都市下水の生成量および処理量の把握

世界の都市下水の生成量および処理量は多くの国において統一的に利用することが出来なかったため、各国の都市下水の生成量および処理量を推定する手法を開発した。各国の都市下水の生成量は都市人口、一人あたりの購買力平価（国民総所得）、都市面積および年平均降水量から算出した。各国の都市下水の処理量は都市人口、一人あたりの購買力平価（国民総所得）、都市面積および衛生施設の普及率から算出した。これらの手法による推定適合度は、都市下水生成量において 0.92、都市下水処理量においては 0.75 であった。そのため、都市下水の生成量と処理量が公的に報告されていない国についても、本手法を適用することにより、これらを十分な精度をもって推定できると判断された。本手法を適用して、世界の年間都市下水の生成量は 2000 年には 460 km<sup>3</sup>、2010 年には 579 km<sup>3</sup> と推定した。2000 年における世界の都市下水生成量は農業取水量の約 20%を賄うことのできる莫大な資源であると考えられた。加えて、都市下水中に含まれる窒素は 26.8 Tg yr<sup>-1</sup>、リンは 4.8 Tg yr<sup>-1</sup> と見積もられた。そのため、農業用水資源として高い代替性を持ち、かつ豊富な窒素やリンなどの養分を多く含む都市下水は、水資源がひっ迫する乾燥地だけではなく、多くの発展途上国において収量の向上や農家の経済的恩恵をもたらす資源であると考えられた。水資源のひっ迫している中東および北アフリカ地域においては、2000 年に 18.6 km<sup>3</sup>（農業取水の 8%）、2010 年に 23.5 km<sup>3</sup>（農業取水の 12%）と推定された。この地域は処理下水の水質が低いことにより、長期間の農業利用は重金属汚染や生物的汚染が生じる懸念がある。しかし、シリア国を始めとしたいくつかの中東および北アフリカ地域の国において、不十分な処理下水を長期間灌漑利用した場合の環境影響評価が十分ではない。

### 2. シリア国における長期都市下水灌漑が農業環境に及ぼす影響

シリア国のアレッポ都市近郊地域における都市下水の長期灌漑利用の環境影響評価を行った。特に、

都市下水の混入した灌漑水の水質および土壌の重金属汚染程度を明らかにした。2009～2010年に毎月都市下水が大半を占めるクウェイク川から採水を行い、生活環境項目{pH, 浮遊物質, 全窒素, 全リン, 生物化学的酸素要求量(BOD<sub>5</sub>), 化学的酸素要求量(COD), 大腸菌群}を分析した。重金属{カドミウム(Cd), クロム(Cr), 銅(Cu), ニッケル(Ni), 鉛(Pb), 亜鉛(Zn)}の汚染程度は25年以上都市下水を利用している農地並びに同程度の灌漑歴を持つ地下水灌漑農地の表層土(0～10 cm)の全重金属含量および可給態含量並びに逐次抽出法および選択溶解法による化学的形態を測定した。クウェイク川は年間を通じて、シリア国基準と比較し、高い浮遊物質, 全窒素, BOD<sub>5</sub>およびCOD濃度並びに多くの大腸菌群を含んでいた。この地域における慣行的な小麦栽培の灌漑(5000 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>)により、シリアの小麦施肥基準の窒素は全量およびリンは半量賄うことが可能であると見積もられた。この地域は都市下水の灌漑利用により高い養分供給能並びに人体への生物的汚染の危険性が高いと考えられた。都市下水灌漑農地においては全Cr, PbおよびZn含量並びに可給態Cd, Cu, NiおよびZn含量が地下水灌漑農地よりも高かった。重金属の化学形態の分析結果より、都市下水灌漑農地のFe酸化物結合態画分の重金属量は地下水灌漑農地よりも高く、Niを除き全ての重金属の有機物結合態画分も高かった。そのため、これらの画分が都市下水灌漑農地における重金属の長期間の吸着源として働いている可能性が考えられた。都市下水灌漑農地においては全Cr, Pb, Zn含量の増加とともにFe酸化物結合態および有機物結合態の重金属が増加していた。これらの増加率はFe酸化物結合態が高く、重金属の汚染の進行に伴い、FeおよびMn酸化物が重金属の吸着源として有機物より安定的に働いたと示唆された。これは測定した重金属の酸化物への吸着特性および結晶化度の低いFe酸化物の比表面積が大きいことによる重金属の吸着能が高いことに起因すると考えられた。更に、Mn酸化物への吸着性が高いPbは易還元性の画分に多く含まれていた。長期間還元状態が維持された場合、結晶化度の低いFe酸化物やMn酸化物が溶解するため、これらに吸着された重金属が土壌中に溶出される危険性が示唆された。従って、長期都市下水灌漑農地においては不適切な表層灌漑などの土壌の長期間還元状態維持によって、集積した重金属を溶出させないことが必要であると考えた。重金属は有害物質であると同時に一部は微量必須元素であり、長期間の都市下水灌漑による乾燥地土壌中の重金属動態の把握は今後の都市下水の持続的かつ安全な農業利用を確立する一助になると考えられた。

以上のことをまとめると、都市下水は有用な水資源であり、養分供給量も莫大であることが明らかになった。その一方で、長期の連用により窒素やリン, 重金属が蓄積していくため、都市下水灌漑農地においては都市下水によって供給される量に基づいた管理が必要であることが明らかとなった。