

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**

佐藤敏雄

2014

目次

目次	ii
図目次.....	v
表目次.....	vi
略語一覧.....	vii
第1章 緒言.....	1
第2章 都市下水の生成, 処理および処理下水の再利用量に関する世界の現状とその評価	4
2.1. 緒言および目的.....	4
2.2. 材料および方法.....	4
2.2.1. 都市下水の定義並びに引用元	4
2.2.1.1. 都市下水の定義	4
2.2.1.2. 都市下水の生成量, 処理量および処理下水の再利用量の引用元	5
2.3. 結果および考察.....	6
2.3.1. 地球規模における都市下水生成量, 処理量および再利用量	6
2.3.2. 世界の各地域における都市下水生成量, 処理量および処理下水の再利用量	16
2.3.2.1. 北アメリカ地域.....	16
2.3.2.2. ラテンアメリカ地域.....	20
2.3.2.3. ヨーロッパ地域.....	24
2.3.2.4. 旧ソビエト連邦諸国.....	28
2.3.2.5. 中東および北アフリカ地域 (MENA 地域)	28
2.3.2.6. サブサハラアフリカ地域.....	34
2.3.2.7. オセアニア地域.....	35
2.3.2.8. アジア地域.....	37
2.4. 結論.....	40
第3章 世界の都市下水の生成量および処理量の推定.....	42
3.1. 緒言および目的.....	42
3.2. 材料および方法.....	43
3.2.1. 都市下水生成量, 処理量および社会指標の引用元並びにその定義	43
3.2.2. 都市下水生成量の推定アプローチ	44

3.2.3. 都市下水生成量の推定モデル	44
3.2.4. 都市下水処理量の推定アプローチ	48
3.2.5. 都市下水処理量の推定モデル	48
3.3. 結果および考察	50
3.3.1. 既存の都市下水の生成量および処理量	50
3.3.2. 世界の都市下水生成量の推定結果	52
3.3.3. 世界の都市下水処理量の推定結果	57
3.4. 結論	61
第4章 シリア国北西部における長期間の都市下水の灌漑利用が環境に及ぼす影響	62
4.1. 長期間の都市下水灌漑利用が農業環境に及ぼす影響～土壌および灌漑水の塩類集積の危険性、肥料成分の蓄積並びに灌漑水の生物化学的汚染指標～	62
4.1.1. 緒言および目的	62
4.1.2. 材料および方法	63
4.1.2.1. 調査地概要	63
4.1.2.2. 灌漑水、土壌および植物体の採取法	63
4.1.2.3. 灌漑水、土壌および植物体分析法	67
4.1.2.3.1. 灌漑水試料	67
4.1.2.3.2. 土壌試料	67
4.1.2.3.2. 植物体試料	68
4.1.2.4. 統計処理	68
4.1.3. 結果および考察	68
4.1.3.1. 灌漑水の流域区分による空間的変動	68
4.1.3.2. 灌漑水の塩類化およびソーダ質化危険性および土壌の塩類化およびソーダ質化の状況	68
4.1.3.2. 灌漑水中の栄養塩濃度と土壌の栄養塩含量	70
4.1.3.3. 植物体収量	74
4.1.3.4. 灌漑水中の化学的酸素要求量および生物化学的酸素要求量並びに細菌量	75
4.1.4. 結論	77
4.2. 長期間の都市下水灌漑利用に伴う土壌重金属汚染	77
4.2.1. 緒言および目的	77
4.2.2. 材料および方法	78
4.2.2.1. 調査地域概要	78

4.2.2.2. 灌漑水, 土壌および植物体の採取法	80
4.2.2.3. 灌漑水分析法	80
4.2.2.4. 土壌分析法	80
4.2.2.5. 植物体分析法	81
4.2.2.6. 土壌の汚染指数	81
4.2.2.7. 統計分析	81
4.2.2.8. シリア国および国際基準による灌漑水, 土壌および植物体中の重金属の評価	81
4.2.3. 結果および考察	85
4.2.3.1. 灌漑水中の重金属汚染	85
4.2.3.2. 長期間の都市下水灌漑が土壌重金属に与える影響	87
4.2.3.2.1. 土壌全重金属含量および可給態重金属含量	87
4.2.3.2.2. 土壌重金属の化学的形態	90
4.2.3.2.3. 選択溶解法による Mn および Fe 酸化物結合画分の重金属	92
4.2.3.3. 小麦子実および茎葉中の重金属含量	96
4.2.4. 結論	96
第5章 総合考察	101
5.1. シリア国北部乾燥地域における長期間の都市下水灌漑利用に関する総合考察	101
5.2. 中東および北アフリカ地域における長期間都市下水灌漑の環境影響評価	103
5.3. 世界の都市下水の農業利用の有用性	105
第6章 要約	109
Summary	112
引用文献	114
付表	132
謝辞	160
学会誌公表論文リスト	161
参考文献	162

図目次

図 1	都市下水生成量，処理量および処理下水の再利用率が利用できる国の数	12
図 2	都市下水の生成量もしくは処理量，処理下水の再利用率が報告されている国の数	13
図 3	最新の都市下水の生成量，処理量および処理下水の再利用率が報告されている国の数	15
図 4	地域ごとの都市下水生成量，処理量および処理下水の再利用率が利用できる国の数	17
図 5	各国における都市下水生成量に対する処理量の割合	18
図 6	都市下水生成量および経済指標との関係性	47
図 7	都市下水処理量および経済指標との関係性	49
図 8	都市下水生成量の報告値と推定値の比較	53
図 9	世界の都市下水の処理水量と未処理水量の推定並びに既存の報告との比較	54
図 10	都市下水処理量の報告値と推定値の比較	58
図 11	各地域における未処理都市下水の推定量	60
図 12	シリア国アレッポ都市近郊地域における調査地域概要	64
図 13	シリア国アレッポ都市近郊地域における都市下水灌漑の様子	65
図 14	シリア国，都市下水を主成分とするクウェイック川の EC および SAR	69
図 15	シリア国，都市下水を主成分とするクウェイック川の窒素組成の経時変化	71
図 16	シリア国，都市下水を主成分とするクウェイック川のリン組成の経時変化	72
図 17	クウェイック川における COD および BOD ₅ の経時変化	76
図 18	調査地域概要	79
図 19	DTPA 抽出重金属含量と全重金属含量，pH，有機物含量との相関図	89
図 20	都市下水灌漑農地における異なる Mn および Fe 酸化物の溶解法による全含量に対する汚染指数（CF）との関係	95
図 21	小麦子実中の重金属含量および土壌重金属全含量，可給態含量，pH，有機物含量との相関関係	97
図 22	小麦茎葉中の重金属含量および土壌重金属全含量，可給態含量，pH，有機物含量との相関関係	98
図 23	クウェイック川における汚染源の模式図	100
図 24	各国の都市下水生成量，処理量および経済指標との関係性	104
図 25	都市下水の農業再利用に関する模式図	108

表目次

表 1	世界 181 か国の地域分類	7
表 2	都市下水生成量, 処理量および処理下水の再利用率が利用できる国の数	8
表 3	都市下水の生成量もしくは処理量, 処理下水の再利用率が報告されている国の数	10
表 4	北アメリカ地域における都市下水生成量, 処理量および処理下水の再利用率	19
表 5	ラテンアメリカ地域における都市下水生成量, 処理量および再利用率	21
表 6	ヨーロッパ地域における都市下水生成量, 処理量および再利用率	25
表 7	旧ソビエト連邦諸国における都市下水生成量, 処理量および再利用率	29
表 8	中東および北アフリカ地域における都市下水生成量, 処理量および再利用率	30
表 9	サブサハラアフリカ地域における都市下水生成量, 処理量および再利用率	31
表 10	オセアニア地域における都市下水生成量, 処理量および再利用率	36
表 11	アジア地域における都市下水生成量, 処理量および再利用率	38
表 12	先進国および発展途上国の湿潤地および乾燥地における都市下水の再利用の動機並びに主要な再利用産業	41
表 13	各国の社会指標の引用元一覧	45
表 14	期間別における都市下水生成量および処理量のデータ数	51
表 15	1985~2010 年における地域ごとの都市下水生成量の推定	56
表 16	シリア国, アレッポ地域のクウェイック川の水量 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) の内訳	66
表 17	シリア国, クウェイック川の養分負荷量 (窒素, リン, カリウム) の推定	73
表 18	土壌重金属の逐次抽出法およびその化学的形態	82
表 19	土壌 Mn および Fe 酸化物の選択溶解法およびその化学的形態	83
表 20	都市下水灌漑農地 (WWF) および地下水灌漑農地 (GWF) の表層土 (0~10 cm) の一般理化学性	84
表 21	シリア国, クウェイック川における全重金属濃度および全水溶性濃度	86
表 22	都市下水灌漑農地 (WWF) および地下水灌漑農地 (GWF) の表層土 (0~10 cm) における全重金属含量	86
表 23	都市下水灌漑農地および地下水灌漑農地の表層土 (0~10 cm) における可給態重金属含量	88
表 24	都市下水灌漑農地 (WWF) および地下水灌漑農地 (GWF) の表層土 (0~10 cm) の各化学的形態における重金属含量および汚染指数 (CF)	91
表 25	都市下水灌漑農地 (WWF) および地下水灌漑農地 (GWF) の表層土 (0~10 cm) における全重金属含量に対する異なる Mn や Fe 酸化物画分中の重金属の割合および汚染指数 (CF)	93
表 26	各経済区分別の都市下水の水質特性	106

略語一覧

Amor-Fe	非晶質性鉄画分
AP	年平均降水量
AUP	年間都市降水総量
BOD	生物化学的酸素要求量
Carb	炭酸カルシウム結合態
Cd	カドミウム
CEC	陽イオン交換容量
CF	汚染指数
C_{hm}	各重金属の土壌または各画分の重金属含量
Cr	クロム
Cry-Fe	結晶性鉄画分
Cu	銅
DTPA	ジエチレントリアミン 5 酢酸 (diethylene-triamine-pentaacetic acid)
EC	電気伝導度
<i>E Coli.</i>	大腸菌群 (<i>Escherichia Coliforms</i>)
Exch	交換態
FAO	国際連合食糧農業機関
FAO-AQUASTAT	国際連合食糧農業機関の水に関する統計データベース
<i>F Coli.</i>	ふん便系大腸菌群 (<i>Fecal Coliforms</i>)
Fe	鉄
GDP	国内総生産
GNI	国民総所得
GNI PPP	国民総所得に基づく購買力平価
GWF	地下水灌漑農地 (4章のみ)
HDI	人間開発指数
ICP-OES	誘導結合プラズマ発光分光分析
II	経済指標
ln	自然対数
ME	推定適合度
MENA	中東および北アフリカ

Mn	マンガン
Mno/Feo	マンガンおよび鉄酸化物結合態
MWWP _{est}	都市下水の生成量の推定値
MWWT _{est}	都市下水の処理量の推定値
NA	データ参照不可能
Ni	ニッケル
OAc	酢酸
OECD	経済開発協力機構
OM	有機物結合態
Pb	鉛
Pop _u	都市人口
Q _{Canal}	ユーフラテス河からクウェイック川への付加水量
Q _{Qweik}	クウェイック川の都市下水混入前の水量
Q _{WWTP}	アレppoの下水処理場からクウェイック川への放出水量
Res	残渣
RRO	易還元性酸化物画分
SAR	ナトリウム吸着比
SASMO	シリア国標準分析機構 (Syrian Arab Standards and Metrology Organization)
SI	衛生施設の普及率
S _{improved}	改良された衛生施設の利用者数
SPSS	統計解析ソフトウェア (Statistical Package for the social Science)
S _{unimproved}	改良された衛生施設の不利用者数
TEA	トリエタノールアミン (triethanolamine)
tmwwp _{est}	年間の暫定都市下水生成量
tmwwt _{est}	年間の暫定都市下水処理量
TSS	浮遊物質
U	総都市面積
UDI	都市発展指数
UN	国際連合
UNEP	国際連合環境計画
UNEP-GPA	陸上活動からの海洋環境の保護に関する世界行動計画

UNESCO	国際連合教育科学文化機関（ユネスコ）
UNESCO-WWAP	ユネスコ世界水アセスメント計画
WB	世界銀行
WHO	世界保健機構
WW _{calculated}	各国の都市下水の生成量もしくは処理量の推定値
WWF	都市下水灌漑農地（4章のみ）
WW _{published}	各国の都市下水の生成量もしくは処理量の報告値
Zn	亜鉛

第1章 緒言

世界の淡水資源および人口は不均等に分布しており、世界人口の40%にすでに深刻な水不足が発生しているといわれている (Bennett, 2000) . 水ストレスは生活水準や経済発展に対して多大な影響を及ぼしていると考えられている (Qadir *et al.*, 2007a) . さらに、2025年には世界人口の約60%が水ストレス下にさらされると予測されている (Pimentel *et al.*, 1999; Rijsberman, 2006) . 水資源がひっ迫している現状において農業は最大の水使用産業であり、世界の取水量の約70%が灌漑に利用されている。一部の発展途上国においては、灌漑利用が全取水量の95%以上を占めている場合がある (FAO-AQUASTAT, 2012) . 灌漑農業は世界の耕作地面積の20%並びに全収量の40%を占めている重要な農業技術である (FAO, 2011) . そのため、灌漑農地の拡大は世界人口の増加に伴って継続する必要があるが、灌漑農業に必要な淡水資源の増加の余地は大きくない (Qadir and Oster, 2004) . さらに、Brown (2011) によると世界人口の半分以上が使用する地下水はすでに過剰に取水されていると見積もられている。

乾燥地のような水資源の限られている地域においては良質な水の競合が生じており、すでに農業用水および生活用水、工業用水間の水資源の再配分が喫緊の課題となっている。その結果、非農業産業への水の配分が増加する一方で農業用水の配分は徐々に減少しており、将来にわたり農業用水は競合しない代替水資源に強く依存すると予測されている (Qadir *et al.*, 2007a) . 農業への代替水資源として、海水や高塩濃度の地下水の脱塩水、ウォーターハーベスティングによる雨水の有効利用並びに都市下水や農業排水、塩性やソーダ質の地下水などの低水質な水資源の利用が挙げられる (Qadir *et al.*, 2007a) . これらの中において、適切な処理を経た都市下水を農業用水に利用することは魅力的な選択肢である。それは、都市人口の急増や急速な都市化、経済発展、生活水準の向上によって、非農業産業の水使用が増加すると同時に、そこからの廃水量が増えるためである。発展途上国の都市および都市近郊地域の大半の小規模農家は利用可能な他の水資源を持たないため、灌漑用水としてすでに都市下水に依存していると考えられている (Qadir *et al.*, 2007a; Raschild-Sally and Jayakoby, 2008; Drechsel *et al.*, 2010) . 都市下水の利用は、さらに、作物への養分供給や換金作物の栽培機会の獲得、収量増加などの利点がある一方、生産者や消費者に対する細菌汚染による衛生状態の悪化、農業環境への重金属汚染に対する懸念がある (Jiménez and Asano, 2008a; Drechsel *et al.*, 2010) . 都市下水の農業利用に関する研究はこれまでよくまとめられている一方で、地球および地域規模における都市下水の生成量、

処理量および再利用量に関する情報は限られている (Qadir *et al.*, 2007b ; Jiménze and Asano, 2008a; Drechsel *et al.*, 2010) .

本研究の背景には、以上に述べてきたように、増加する人口や経済発展のために最大水使用産業である農業において、競合しない水資源の確保が喫緊の課題である。そのなかで、都市下水を農業に利用することは水資源の代替性が高い一方、重金属の農業環境への混入など都市下水が農業環境に与える影響が十分に行われていない。そのことから、乾燥地のような水資源の限られている地域において、都市下水の利用による農業管理が必ずしも適切にはなされていない。したがって、乾燥地の都市下水灌漑農業において、適切な農業管理を行うためには、都市下水の長期連用に伴う土壌中の重金属の動態の把握をはじめとした土壌—植物系に与える影響の把握が必要である。加えて、乾燥地における都市下水の灌漑利用を明らかにするためには、世界の都市下水の生成、処理および再利用量ならびに都市下水の利用状況を把握することが基本的なことである。つまり、世界の都市下水の利用状況から、乾燥地における都市下水を特徴づけることにより、乾燥地における都市下水の利用の動機を明らかにし、乾燥地に適応した都市下水の農業管理法を提案する必要がある。

そこで、本研究においては、都市下水の安全な農業利用を確立する一助とするため、世界の国や各地域における都市下水の農業用水資源としての有用性および現状の動向を量的な観点から把握を行い、都市下水生成量および処理量の現状並びに 1985 年から 2010 年までの経時変化、処理下水の再利用量の現状を統一的かつ包括的に把握をした。また、都市下水の農業利用が増大していく地域における都市下水の長期間の灌漑利用が土壌—植物系に与える影響を明らかにした。

すなわち、第 2 章では、既存の報告を基に世界の国や地域における都市下水の生成、処理および処理下水の再利用量をそれぞれ明らかにした。また、都市下水を農業に再利用している場合はその利用面積を把握した。これらを基に都市下水の再利用の動機を各地域別に検討した。

第 3 章では、都市下水から水資源への変換可能な存在量を把握するために、世界の各地域における都市下水の生成および処理量を推定する手法を開発し、その精度を検討した。また、1985 年から 2010 年までの都市下水生成量および処理量を推定し、それらの経時変化について地域毎に特徴を把握した。

第 4 章では、都市下水の農業利用が増大していく地域において、長期間の都市下水灌

漑利用が農業環境に及ぼす影響を把握することを目的とし、シリア・アラブ共和国（以下、シリア国）北部乾燥地域であるクウェイック川流域を調査した。都市下水を主たる水源とするシリア国クウェイック川の水質に関して、土壌塩類化の危険性、栄養負荷および生物化学的汚染指標を用いて、空間的並びに時間的変動を評価した。加えて、都市下水の農業利用の深刻な環境汚染リスクの一つである重金属の汚染実態を把握するため、灌漑水の重金属濃度並びに土壌および作物中の重金属含量を明らかにした。土壌重金属は全含量だけでなく、逐次抽出法、選択溶解法も適用して化学的形態を考慮に入れた検討を行った。

第 5 章では、本研究で得られた結果を総合し、今後、都市下水の農業利用が増大すると考えられる中東および北アフリカ地域において、長期間の都市下水灌漑が農業環境に与える影響を論じ、都市下水の農業利用の適切な総合管理法の在り方を提言した。

第2章 都市下水の生成，処理および処理下水の再利用量に関する 世界の現状とその評価

2.1. 緒言および目的

都市下水の農業利用に関する研究はこれまでよくまとめられている一方で，地球および地域規模における都市下水の生成量，処理量および処理下水の再利用量に関する情報は限られている（Qadir *et al.*, 2007a ; Jiménze and Asano, 2008a; Drechsel *et al.*, 2010）．世界の水資源の包括的なデータベースに国際連合食糧農業機関が整備する FAO-AQUASTAT がある．このデータベースでさえ，多くの国の情報が不足しており，さらに，いくつかの国においては，最近の情報へ更新されていない状況である（FAO-AQUASTAT, 2012; 都市下水生成量：77 か国; 都市下水処理量：82 か国; 処理下水の再利用量：37 か国）．各国における都市下水の生成，処理および再利用の現状に関する情報は，廃水処理や処理下水の再利用を目指す国家行動計画や法律，規則の基準値策定，加えて，農業における都市下水の効率的な利用開発のための基礎情報の一つである．そのため，これらを取り扱う政策立案者や研究者，実務者，政府機関にとっても重要な判断材料であると考えられる．さらに，環境保全や住民の健康保護の観点からも世界，地域および国家レベルにおける情報の集約が求められている．

そこで，本章においては，世界や各地域における都市下水の潜在的な有用性並びに現状の動向を量的な観点から明らかにするために，世界の都市下水に関する利用可能なデータの収集および統合を行った．特に，各国の都市下水生成量，処理量および処理下水の再利用量の最新データの収集を行った．

2.2. 材料および方法

2.2.1. 都市下水の定義並びに引用元

2.2.1.1. 都市下水の定義

データを収集，整理および統合するために都市下水の生成量および処理量並びに再利用を以下のように定義した．「都市下水の生成量」とは，家庭，商業および工業廃水並びにその他の都市流去水の合計量（冷却水を除く^{注1}）のことである．「都市下水の処理」と

^{注1} 冷却水とは，火力・原子力発電所において，冷却目的に利用された排水のことである．この冷却水は特別な処理を行うことなく他の人間活動に使用できると考えられている（Solley *et al.*, 1997; Vassolo and Döll, 2005; Cornel and Meda, 2008）

は、物理的および/または化学的処理過程の任意の種類によって処理した廃水からなる。つまり、一次、二次、または高次処理された廃水のことである。すなわち、「都市下水処理量」とは家庭、商業および工業廃水並びにその他の都市流去水の合計量のうち、都市下水処理された水量の合計量 (FAO-AQUASTAT, 2012)。「再利用量」とは、特別な言及がある場合を除き、都市下水を他の人間活動に利用した合計水量のことである。

2.2.1.2. 都市下水の生成量、処理量および処理下水の再利用量の引用元

各国における都市下水の生成量、処理量および処理下水の再利用量のデータ収集を行うために以下の出版物およびインターネット上に公開されている最新のデータを使用した。各国の都市下水の生成量、処理量および処理下水の再利用量は国際連合食糧農業機関の統計データ (FAO, 2011; FAO-AQUASTAT, 2012), 欧州連合の統計データ (EUROSTAT, 2013a), 各国の統計データ (NIWP, 2010; CSBL, 2011; CROSTAT, 2012; CSO, 2012; FIE, 2012; NBSRM, 2012; National Statistics Institute, Spain, 2012; SCSU, 2012; Statistics Netherlands, 2012; TURKSTAT, 2012) 並びに各種出版物 (Solley *et al.*, 1998; Shrivastava and Swarup, 2000; UN, 2000; PECDR, 2001; UNECE, 2001, 2009; Basandorj, 2002; UNMIK, 2003; UNDESA-DSD, 2004; USEPA, 2004; AQUAREC, 2006; Nyachhyon, 2006; Jiménez and Asano, 2008a; Kamal *et al.*, 2008; MNRERF, 2009; PMDFEU, 2009; ABS, 2010; Environment Canada, 2010; MEPPRC, 2010; MONSTAT, 2010; van Rooijen *et al.*, 2010; NSCRB, 2011; RMSSO, 2011; Aziz and Aws 2012; Deras, 2012; FOSFBH, 2012; Gomez *et al.*, 2012; Gyampo, 2012; Joysury *et al.*, 2012; Kaur *et al.*, 2012; Kayizzi *et al.*, 2012; Lekhooana, 2012; Marka, 2012; MENZ, 2012; Moyo, 2012; Murtaza, 2012; Navarrete and Viches, 2012; NSSRA, 2012; Pérez and Montás, 2012; Saloua, 2012; SORS, 2012; SORSi 2012; Souare *et al.*, 2012; Tajrishy, 2012; Ulimat, 2012; 国土交通省, 2012) を利用した。

国際連合食糧農業機関のデータベース (以下, FAO-AQUASTAT) に記載された値はそれぞれの報告や出版物から新しいもしくは一貫したデータが使用できる場合のみ更新した。例えば, FAO-AQUASTAT (2012) において最新の日本の都市下水処理量は 1993 年におけるデータ ($11.37 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$) であったが, 国土交通省 (2012) によれば 2009 年におけるデータ ($14.65 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$) が利用可能であるため, FAO-AQUASTAT (2012) のデータを 1993 年から 2009 年のデータへと更新した。FAO-AQUASTAT のデータには, 日本のような事例が多く認められ, 都市下水の生成量, 処理量および再利用量を同様に更新した。また, 既存の報告における「予測値」は, 特別な言及がある場合を除き, 既存の報告の出版

年を報告年とした。例えば、Nyachhyon (2006) はネパール国における都市下水生成量は $0.351 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$ と予測し、UNMIK (2003) はコンゴ国における都市下水の生成量を $16.7 \text{ 万 m}^3 \text{ yr}^{-1}$ と予測している。これらの場合、それぞれ 2006 年および 2003 年をネパール国とコンゴ国における都市下水生成量の報告年とした。また、いくつかの国においては複数の機関から異なる値が報告されている場合があったが、その場合、都市下水生成量、処理量および処理下水の再利用量の報告年が最新かつ一貫するようなデータを使用した。例えば、FAO-AQUASTAT (2012) におけるスペイン国の最新のデータは都市下水生成量 ($2.96 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$)、処理量 ($3.16 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$) および再利用量 ($0.368 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$) であり、それぞれの報告年は 2004 年、2008 年および 2007 年であった。スペイン国における都市下水生成量は 2004 年である一方、処理量は 2008 年であり、都市下水処理量は生成量を上回っていた。National Statistics Institute, Spain (2012) によれば、都市下水生成量、処理量および処理下水の再利用量のデータは、2007 年において報告年が同一に利用可能であった。そのため最新のデータではなく、これらのデータを本章においては利用した。このような事例は他にも存在しており、同様の処理を行った。

2.3. 結果および考察

2.3.1. 地球規模における都市下水生成量、処理量および再利用量

世界 181 か国 (表 1) についてのデータ収集の結果、55 か国 (世界の国の 30.4%) が都市下水の生成量、処理量および処理下水の再利用量が全て報告されていた (図 1, 表 2)。都市下水の生成量もしくは処理量、処理下水の再利用量のいずれかのデータが参照可能であった国は 69 か国であり、世界の国の 38.1% に相当した。残りの 57 か国 (同 31.5%) においてはいずれのデータも利用できなかった。加えて、いくつかの国においては、都市下水の生成量もしくは処理量、再利用量の報告年に大きな差異があった。例えば、チリ国における都市下水処理量 ($0.048 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$) は報告年が 2001 年であり、処理下水の再利用量 ($0.117 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$) は 2008 年であった。そのため、処理下水の再利用量が処理量を上回る状況になっていた。さらに、2008 年における都市下水の再利用に関するデータは、未処理の都市下水を含んでいる可能性も示唆されている (USEPA, 2004)。

都市下水生成量を報告している国は 113 か国であり、処理量は 103 か国、再利用量は 62 か国であった (図 2, 表 3)。これらの結果は都市下水を量的に把握しながら再利用している国が、世界のわずか 30.4% しかないということである。これは、各国政府が都市下

表 1 世界 181 か国の地域分類

地域	構成国	構成国数
北アメリカ	カナダ国, アメリカ合衆国 (米国)	2
ラテンアメリカ	アンティグア・バーブーダ国, アルゼンチン国, ベリーズ国, ボリビア国, ブラジル国, チリ国, コロンビア国, コスタリカ国, キューバ国, ドミニカ共和国, エクアドル国, エルサルバドル国, グアテマラ国, メキシコ国, ニカラグア国, パナマ国, パラグアイ国, ペルー国, ベネズエラ国, バルバドス国, ドミニカ国, グレナダ国, ガイアナ国, ハイチ国, ホンジュラス国, ジャマイカ国, セントクリストファー・ネイヴィス国, セントルシア国, セントビンセント及びグレナディーン諸島国, スリナム国, トリニダード・トバゴ国, ウルグアイ国	32
ヨーロッパ	オーストリア国, ベルギー国, ボスニア・ヘルツェゴビナ国, ブルガリア国, クロアチア国, キプロス国, チェコ国, デンマーク国, フランス国, ドイツ国, ギリシャ国, ハンガリー国, アイルランド国, イタリア国, コソボ国, ルクセンブルグ国, マルタ国, モナコ国, モンテネグロ国, オランダ国, ポーランド国, ポルトガル国, マケドニア国, ルーマニア国, セルビア国, スロバキア国, スロベニア国, スペイン国, スウェーデン国, スイス国, イギリス国 (英国), アルバニア国, フィンランド国, アイスランド国, ノルウェイ国	35
旧ソビエト連邦諸国	アルメニア国, アゼルバイジャン国, ベラルーシ国, エストニア国, グルジア国, カザフスタン国, キルギスタン国, ラトビア国, リトアニア国, モルドバ国, ロシア国, タジキスタン国, トルクメニスタン国, ウクライナ国, ウズベキスタン国	15
中東および北アフリカ	アルジェリア国, バーレーン国, エジプト国, イラン国, イラク国, イスラエル国, ヨルダン国, クウェイト国, レバノン国, リビア国, モロッコ国, オマーン国, パレスチナ自治政府, カタール国, サウジアラビア国, シリア国, チェニア国, トルコ国, アラブ首長国連邦, イエメン国	20
サブサハラアフリカ	ボツワナ国, ブルキナファソ国, コートジボワール国, ジブチ国, エリトリア国, エチオピア国, ガーナ国, レソト国, モーリタニア国, モーリシャス国, ナミビア国, セネガル国, セーシェル国, 南アフリカ国, スワジランド国, ウガンダ国, アンゴラ国, ベナン国, ブルンジ国, カメルーン国, カーボヴェルデ国, 中央アフリカ国, チャド国, コモロ国, コンゴ共和国, コンゴ民主共和国, 赤道ギニア国, ガボン国, ガンビア国, ギニア国, ギニアビサウ国, ケニア国, リベリア国, マダガスカル国, マラウイ国, マリ国, モザンビーク国, ナイジェリア国, ニジェール国, ルワンダ国, サントメ・プリンシペ国, シエラレオネ国, ソマリア国, スーダン国 (南スーダン国を含む), タンザニア国, トーゴ国, ザンビア国, ジンバブエ国	48
オセアニア	オーストラリア国, ニュージーランド国, フィジー国, ソロモン諸島国	4
アジア	バングラデシュ国, ブータン国, カンボジア国, 中国, インド国, 日本, ラオス国, マレーシア国, モルディブ国, モンゴル国, ミャンマー国, ネパール国, パキスタン国, フィリピン国, 韓国, シンガポール国, スリランカ国, タイ国, ベトナム国, アフガニスタン国, プルネイ国, 北朝鮮, インドネシア国, パプアニューギニア国, 東ティモール国	25

表 2 都市下水生成量，処理量および処理下水の再利用量が利用できる国の数
それぞれの区分は脚注 2 に準ずる。

地域	「全側面報告」国	「一部報告」国	「未報告」国
北アメリカ	アメリカ合衆国（米国）	カナダ国，	
ラテンアメリカ	アルゼンチン国，ボリビア国，ブラジル国，チリ国，ドミニカ共和国，グアテマラ国，メキシコ国，ニカラグア国，ペルー国，	アンティグア・バーブーダ国，ベリーズ国，コロンビア国，コスタリカ国，キューバ国，エクアドル国，エルサルバドル国，パナマ国，パラグアイ国，ベネズエラ国，	バルバドス国，ドミニカ国，グレナダ国，ガイアナ国，ハイチ国，ホンジュラス国，ジャマイカ国，セントクリストファー・ネーヴィス国，セントルシア国，セントビンセント及びグレナディーン諸島国，スリナム国，トリニダード・トバゴ国，ウルグアイ国
ヨーロッパ	キプロス国，フランス国，ドイツ国，イタリア国，マルタ国，オランダ国，ポーランド国，ポルトガル国，スペイン国，イギリス国（英国），	オーストリア国，ベルギー国，ボスニア・ヘルツェゴビナ国，ブルガリア国，クロアチア国，チェコ国，デンマーク国，ギリシャ国，ハンガリー国，アイルランド国，コソボ国，ルクセンブルグ国，モナコ国，モンテネグロ国，マケドニア国，ルーマニア国，セルビア国，スロバキア国，スロベニア国，スウェーデン国，スイス国，	アルバニア国，フィンランド国，アイスランド国，ノルウェー国
旧ソビエト連邦諸国	アルメニア国，アゼルバイジャン国，カザフスタン国，キルギスタン国，ラトビア国，リトアニア国，トルクメニスタン国，ウズベキスタン国	ベラルーシ国，エストニア国，グルジア国，モルドバ国，ロシア国，タジキスタン国，ウクライナ国，	
中東および北アフリカ	バーレーン国，エジプト国，イラン国，イスラエル国，ヨルダン国，クウェイト国，レバノン国，リビア国，モロッコ国，オマーン国，パレスチナ自治政府，カタール国，サウジアラビア国，シリア国，チェンジア国，トルコ国，アラブ首長国連邦，イエメン国	アルジェリア国，イラク国，	

表 2 続き

地域	「全側面報告」国	「一部報告」国	「未報告」国
サブサハラアフリカ	セネガル国, セーシェル国, 南アフリカ国	ボツワナ国, ブルキナファソ国, コートジボワール国, ジブチ国, エリトリア国, エチオピア国, ガーナ国, レソト国, モーリタニア国, モーリシャス国, ナミビア国, スワジランド国, ウガンダ国,	アンゴラ国, ベナン国, ブルンジ国, カメルーン国, カーボヴェルデ国, 中央アフリカ国, チャド国, コモロ国, コンゴ共和国, コンゴ民主共和国, 赤道ギニア国, ガボン国, ガンビア国, ギニア国, ギニアビサウ国, ケニア国, リベリア国, マダガスカル国, マラウイ国, マリ国, モザンビーク国, ナイジェリア国, ニジェール国, ルワンダ国, サントメ・プリンシペ国, シエラレオネ国, ソマリア国, スーダン国 (南スーダン国を含む), タンザニア国, トーゴ国, ザンビア国, ジンバブエ国
オセアニア	オーストラリア国,	ニュージーランド国	フィジー国, ソロモン諸島国
アジア	中国, インド国, 日本, 韓国, ベトナム国	バングラデシュ国, ブータン国, カンボジア国, ラオス国, マレーシア国, モルディブ国, モンゴル国, ミャンマー国, ネパール国, パキスタン国, フィリピン国, シンガポール国, スリランカ国, タイ国	アフガニスタン国, ブルネイ国, 北朝鮮, インドネシア国, パプアニューギニア国, 東ティモール国

表 3 都市下水の生成量もしくは処理量，処理下水の再利用量が報告されている国の数

地域	「都市下水生成量」の報告がある国	「都市下水処理量」の報告がある国	「処理下水の再利用量」の報告がある国
北アメリカ	カナダ国，アメリカ合衆国（米国）	カナダ国，アメリカ合衆国（米国）	アメリカ合衆国（米国）
ラテンアメリカ	アルゼンチン国，ベリーズ国，ボリビア国，ブラジル国，チリ国，コロンビア国，コスタリカ国，キューバ国，ドミニカ共和国，エクアドル国，エルサルバドル国，グアテマラ国，メキシコ国，ニカラグア国，パナマ国，パラグアイ国，ペルー国，ベネズエラ国	アンティグア・バーブーダ国，アルゼンチン国，ボリビア国，ブラジル国，チリ国，コロンビア国，コスタリカ国，キューバ国，ドミニカ共和国，エクアドル国，エルサルバドル国，グアテマラ国，メキシコ国，ニカラグア国，ペルー国	アルゼンチン国，ボリビア国，ブラジル国，チリ国，ドミニカ共和国，グアテマラ国，メキシコ国，ニカラグア国，ペルー国
ヨーロッパ	オーストリア国，ベルギー国，ボスニア・ヘルツェゴビナ国，ブルガリア国，クロアチア国，キプロス国，チェコ国，フランス国，ドイツ国，ハンガリー国，イタリア国，コソボ国，ルクセンブルグ国，マルタ国，モナコ国，モンテネグロ国，オランダ国，ポーランド国，ポルトガル国，マケドニア国，ルーマニア国，セルビア国，スロバキア国，スロベニア国，スペイン国，スイス国，イギリス国（英国）	オーストリア国，ボスニア・ヘルツェゴビナ国，ブルガリア国，クロアチア国，キプロス国，チェコ国，デンマーク国，フランス国，ドイツ国，ギリシャ国，ハンガリー国，アイルランド国，イタリア国，ルクセンブルグ国，マルタ国，モナコ国，モンテネグロ国，オランダ国，ポーランド国，ポルトガル国，マケドニア国，ルーマニア国，セルビア国，スロバキア国，スロベニア国，スペイン国，スウェーデン国，イギリス国（英国）	ベルギー国，キプロス国，フランス国，ドイツ国，ギリシャ国，イタリア国，マルタ国，オランダ国，ポーランド国，ポルトガル国，スペイン国，イギリス国（英国）
旧ソビエト連邦諸国	アルメニア国，アゼルバイジャン国，ベラルーシ国，エストニア国，カザフスタン国，キルギスタン国，ラトビア国，リトアニア国，モルドバ国，ロシア国，タジキスタン国，トルクメニスタン国，ウクライナ国，ウズベキスタン国	アルメニア国，アゼルバイジャン国，ベラルーシ国，エストニア国，グルジア国，カザフスタン国，キルギスタン国，ラトビア国，リトアニア国，モルドバ国，ロシア国，タジキスタン国，トルクメニスタン国，ウクライナ国，ウズベキスタン国	アルメニア国，アゼルバイジャン国，カザフスタン国，キルギスタン国，ラトビア国，リトアニア国，トルクメニスタン国，ウズベキスタン国

表 3 続き

地域	「都市下水生成量」の報告がある国	「都市下水処理量」の報告がある国	「処理下水の再利用量」の報告がある国
中東および北アフリカ	アルジェリア国, バーレーン国, エジプト国, イラン国, イラク国, イスラエル国, ヨルダン国, クウェイト国, レバノン国, リビア国, モロッコ国, オマーン国, パレスチナ自治政府, カタール国, サウジアラビア国, シリア国, チェニジア国, トルコ国, アラブ首長国連邦, イエメン国	アルジェリア国, バーレーン国, エジプト国, イラン国, イラク国, イスラエル国, ヨルダン国, クウェイト国, レバノン国, リビア国, モロッコ国, オマーン国, パレスチナ自治政府, カタール国, サウジアラビア国, シリア国, チェニジア国, トルコ国, アラブ首長国連邦, イエメン国	バーレーン国, エジプト国, イラン国, イスラエル国, ヨルダン国, クウェイト国, レバノン国, リビア国, モロッコ国, オマーン国, パレスチナ自治政府, カタール国, サウジアラビア国, シリア国, チェニジア国, トルコ国, アラブ首長国連邦, イエメン国
サブサハラアフリカ	ボツワナ国, ブルキナファソ国, エリトリア国, エチオピア国, ガーナ国, レソト国, ナミビア国, セネガル国, セーシェル国, 南アフリカ国, スワジランド国, ウガンダ国	ボツワナ国, コートジボワール国, ガーナ国, モーリタニア国, モーリシャス国, セネガル国, セーシェル国, 南アフリカ国, スワジランド国	ジブチ国, エチオピア国, モーリタニア国, モーリシャス国, ナミビア国, セネガル国, セーシェル国, 南アフリカ国
オセアニア	オーストラリア国	オーストラリア国, ニューージーランド国	オーストラリア国
アジア	バングラデシュ国, ブータン国, カンボジア国, 中国, インド国, 日本, ラオス国, マレーシア国, モルディブ国, モンゴル国, ミャンマー国, ネパール国, パキスタン国, フィリピン国, 韓国, シンガポール国, スリランカ国, タイ国, ベトナム国	カンボジア国, 中国, インド国, 日本, マレーシア国, モンゴル国, ネパール国, パキスタン国, フィリピン国, 韓国, タイ国, ベトナム国	中国, インド国, 日本, 韓国, シンガポール国, ベトナム国

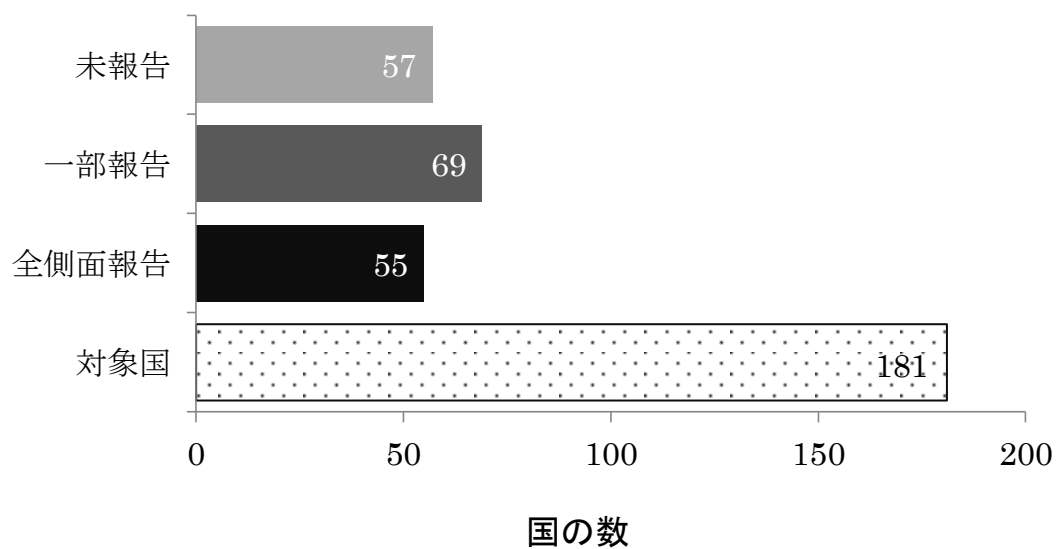


図 1 都市下水生成量，処理量および処理下水の再利用量が利用できる国の数
それぞれの区分は脚注 2 に準ずる。

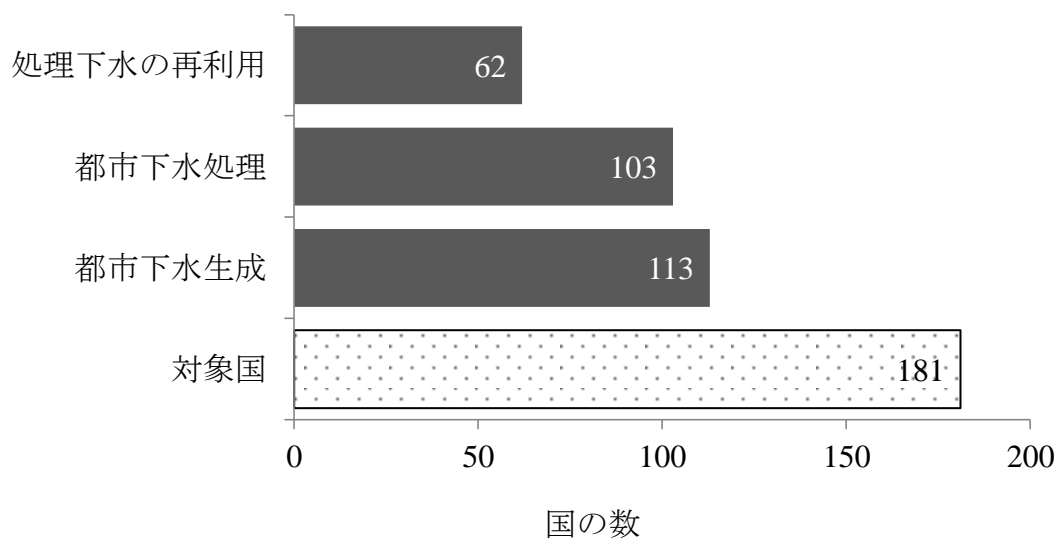


図 2 都市下水の生成量もしくは処理量，処理下水の再利用量が報告されている国の数

水を農業利用すると食品の安全性および他の植物衛生措置を講ずる必要があること、並びに農産物の国際貿易に対して経済的に深刻な影響が生じる可能性等により、調査に対して消極的であることが一因として考えられた (Qadir *et al.*, 2010a) . 実際、1991 年にいくつかのアラビア半島やペルシャ湾諸国の政府は不十分な処理の都市下水を灌漑利用している地域からの果実や野菜に対する輸入制限を行い、この制限によりヨルダン国の農作物輸出は深刻な影響を受けた (McCornick *et al.*, 2004) . ヨルダン国政府はこの事態に対し、農家と消費者の健康を守るための基準の導入や下水処理場の改善などの積極的なキャンペーン活動を講じることになった。ヨルダン国政府は現在も地域や国際貿易の重要性からこの敏感な状況に焦点を当て続けており、これは都市下水灌漑によって生じる間接的および直接的な影響を示す重要な示唆を持つ一つの事例である。

経時的に都市下水の生成量、処理量および処理下水の再利用量の報告国を比較すると、全データの 37%が 2008 年～2012 年の報告であった。全データの 55%は 1998 年～2007 年における報告であり、1997 年以前のデータは 9%を占めた (図 3) . 利用可能なデータがある場合においても半分以上の値が最新ではなく、これらから都市下水の生成量や処理量、処理下水の再利用量の現状を把握することは難しいと考えられた。特に、近年農村から都市へ移住が進んでいる発展途上国においては、都市人口の増加によって都市下水生成量が大幅に増加していると推測され、この都市下水生成量の増加は更なる再利用量の増加をもたらしていると示唆された。

地球規模における都市下水灌漑面積は、450 万 ha に及ぶと推定されている (Jiménez and Asano, 2008b) . また、未処理の都市下水を利用している灌漑農地は少なくとも 2,000 万 ha あり、農業従事者は 200 万人に及ぶと推定されている (Hussain *et al.*, 2001; Scott *et al.*, 2004; Raschid-Sally and Jayakody, 2008) . これらのデータに基づけば、世界の都市下水灌漑農地は、世界の灌漑農地面積 (3.11 億 ha) の 1.5～6.6%を占めていると見積もられる。これらの面積や農業従事者の数は多くの出版物や発表に引用されているが、これまで地球規模で包括的に都市下水灌漑農地面積や農家の数を明らかにした研究は行われておらず、実態を詳細にとらえるためには、更なる調査や報告が必要と考えられた。

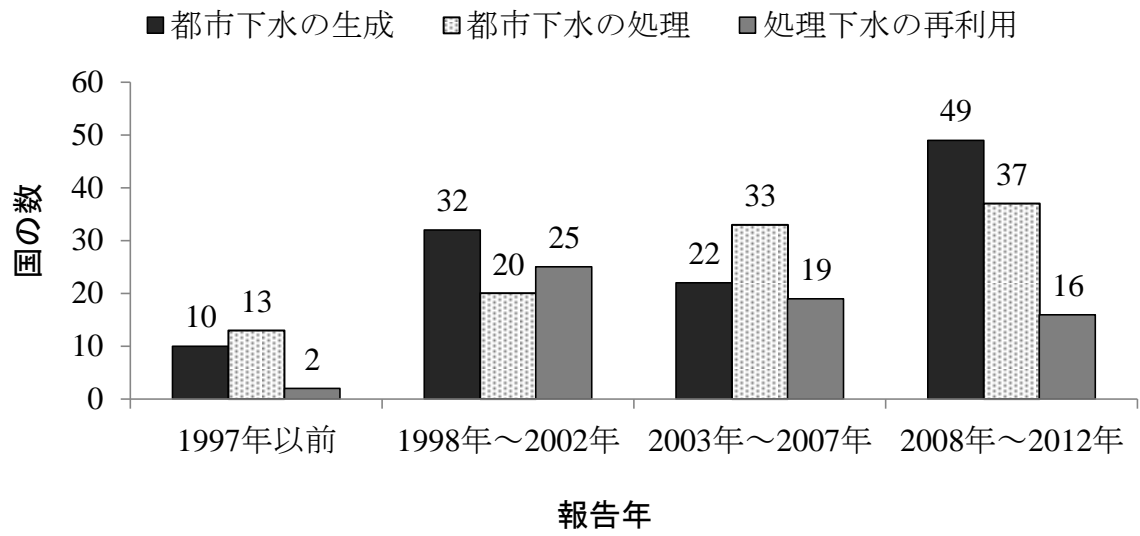


図 3 最新の都市下水の生成量，処理量および処理下水の再利用量が報告されている国の数

2.3.2. 世界の各地域における都市下水生成量，処理量および処理下水の再利用量

本研究では，FAO の地域分類（FAO, 2003a）に基づいて，それを一部改良して，次に示すように世界の地域を区分した．つまり，北アメリカ {（アメリカ合衆国（以下，米国）およびカナダ国）}，ラテンアメリカ（メキシコ国並びに「中央アメリカとカリブ諸国」および「南アメリカ」地域），ヨーロッパ（旧ソビエト連邦構成国を除いた「西ヨーロッパおよび中央ヨーロッパ」），旧ソビエト連邦諸国（旧ソビエト連邦構成国），中東および北アフリカ（「中東」および「北アフリカ」地域；以下，MENA），サブサハラアフリカ（その他のアフリカ諸国），オセアニア（「オセアニアおよび太平洋諸国」），アジア（アフガニスタン国並びに「南アジアおよび東アジア」地域）である（表1）．

各地域における国数は次のとおりである．北アメリカ 2 개국，ラテンアメリカ 32 개국，ヨーロッパ 35 개국，旧ソビエト連邦諸国 15 개국，MENA 20 개국，サブサハラアフリカ 48 개국，オセアニア 4 개국およびアジア 25 개국．図 4 に各地域における都市下水の生成量，処理量および処理下水の再利用量について，「全側面報告」，「一部報告」および「未報告」の三分区^{注2}として図示した．また，図 5 は各国における都市下水生成量に対する処理量の割合を示している．

世界銀行（WB）による経済区分（WB, 2012）を用いると，高所得国においては処理割合が平均 70%であったが，経済状況が低下すると処理割合も著しく低下し，上位中所得国において 38%であり，下位中所得国で 28%，低所得国ではわずか 8%であった．

2.3.2.1. 北アメリカ地域

北アメリカ地域における都市下水の生成量は $85 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$ であり，このうちの 72% ($61 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$) が処理されている（表 4）．この多量の都市下水生成量および処理量は，発達した経済による多量の生活用取水および工業用取水に起因すると考えられた．一方，処理都市下水の再利用量は $2.3 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$ であり，この地域における都市下水処理量の 3.8%に相当する．この地域においては都市下水生成量の 72%が処理されている一方，処理都市下水の大半が再利用されていないことが明らかになった．大半の処理下水が再利用されていないのは，この地域が概して水資源が豊富に含まれるためだと考えられた．この地域の一人あ

^{注2}「全側面報告」とは都市下水の生成量および処理量，処理下水の再利用量が報告されていることを示し，「一部報告」とは一つもしくは二つ都市下水の生成量および処理量，処理下水の再利用量が報告されていることを表し，「未報告」とはいずれの報告がないことを示している．

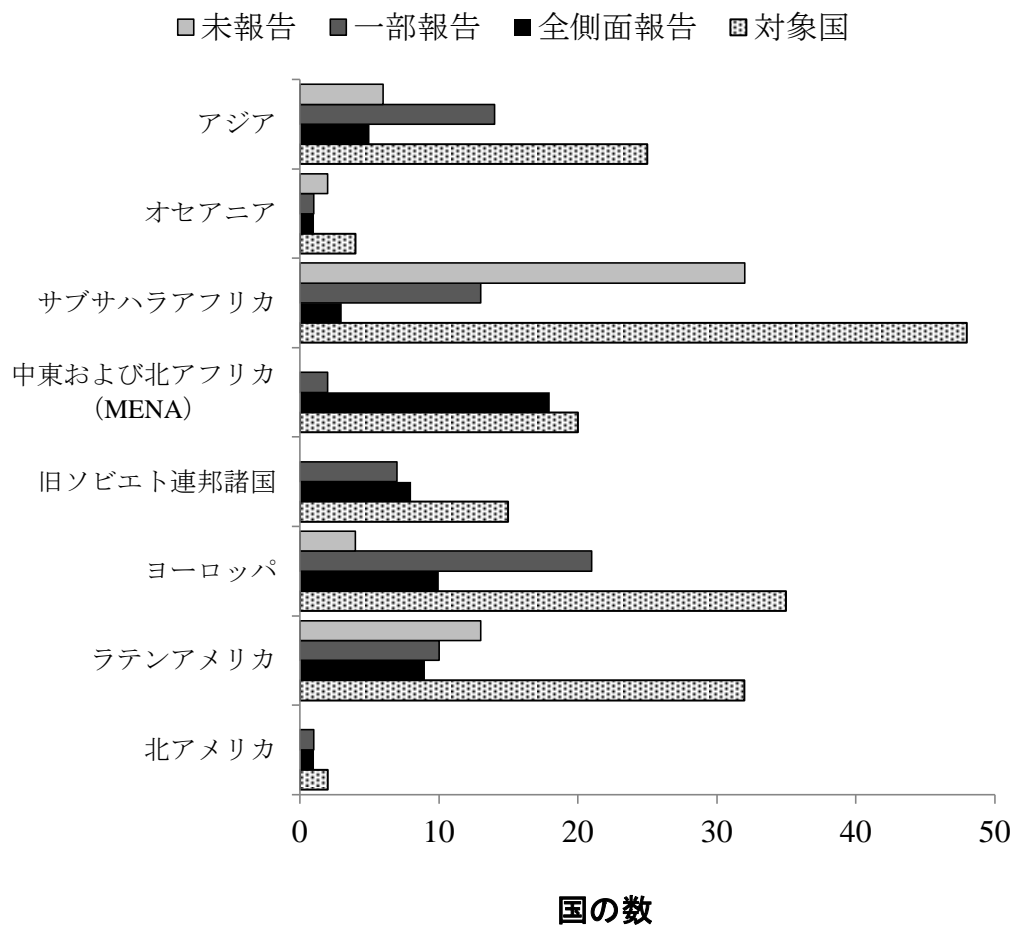


図 4 地域ごとの都市下水生成量，処理量および処理下水の再利用量が利用できる国の数
それぞれの区分は脚注 2 に準ずる。

いくつかの国において，都市下水の生成量，処理量および処理下水の再利用量は異なる情報源並びに報告年を利用している場合がある。

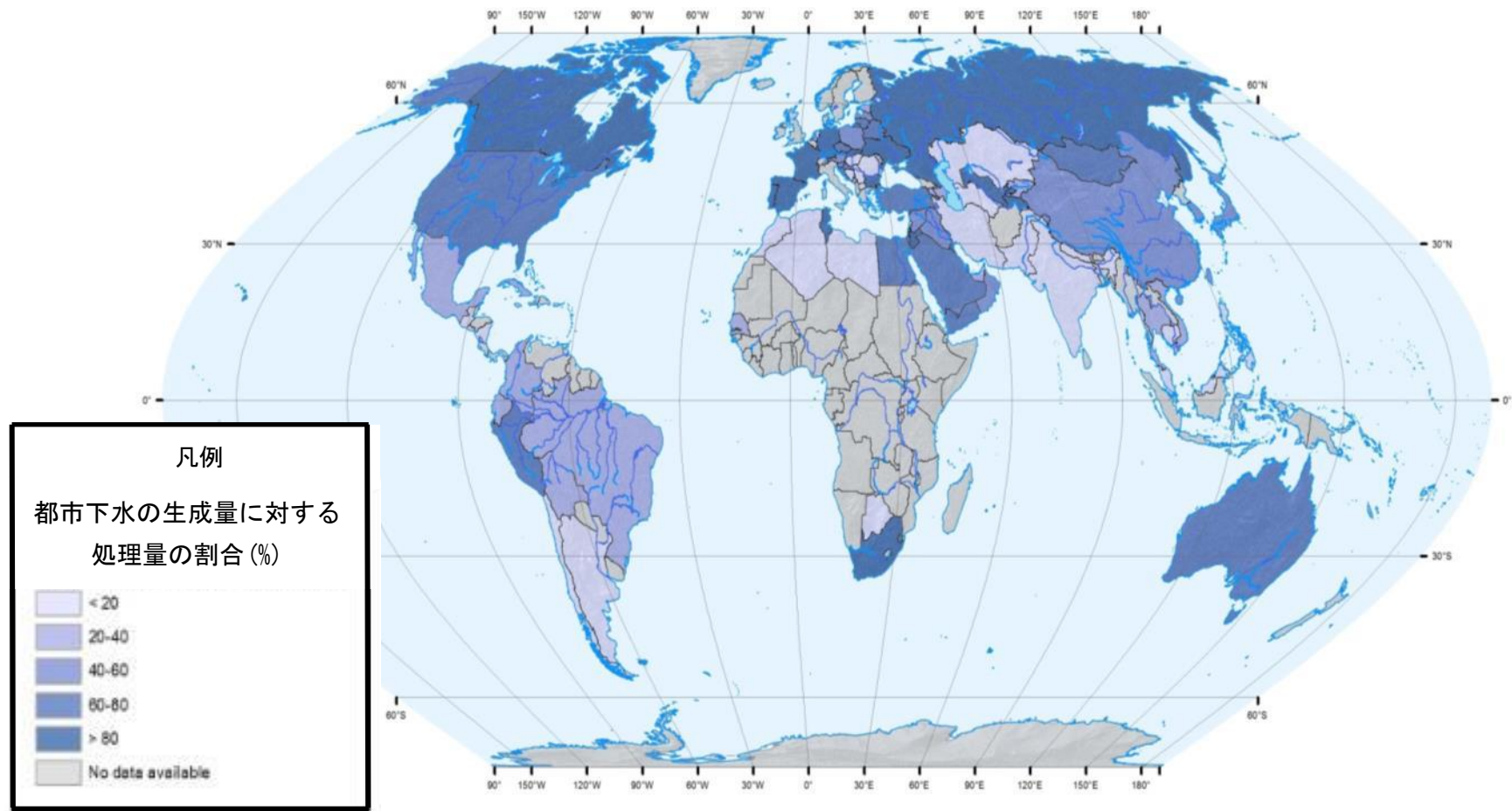


図 5 各国における都市下水生成量に対する処理量の割合
(FAO-AQUASTAT, 2012; EUROSTAT, 2013a; 表 1~8 の引用文献に基づく)

表 4 北アメリカ地域における都市下水生成量，処理量および処理下水の再利用量

国名（略称）	都市下水生成		都市下水処理量		処理下水の再利用	
	報告年	生成量 ($\text{km}^3 \text{ yr}^{-1}$)	報告年	処理量 ($\text{km}^3 \text{ yr}^{-1}$)	報告年	再利用量 ($\text{km}^3 \text{ yr}^{-1}$)
カナダ国	2006	5.395 ^a	2006	4.477 ^a	—	NA
アメリカ合衆国 (米国)	1995	79.573 ^b	1995	56.642 ^b	2002	2.345 ^c
上記 2 か国の合計		84.968		61.119		2.345

^a Environment Canada (2010)

^b Solley *et al.* (1998)

^c USEPA (2004)

NA はデータが参照できなかったことを意味する (Not Available) .

たりの水資源賦存量は 2009 年に $15,000 \text{ m}^3 \text{ yr}^{-1}$ を超えていた (FAO-AQUASTAT, 2012) . カナダ国においては処理下水の再利用量に関する情報は利用できなかったが、数々の再利用プロジェクトが試験規模で行われていた (Exall *et al.*, 2008) . 米国におけるほとんどの処理下水の再利用プロジェクトは乾燥地および半乾燥地において行われており、アリゾナ州、カリフォルニア州、テキサス州およびフロリダ州の 4 州において国内の全再利用量の 90% 以上を占めていた (USEPA, 2004) . 一方、急速な都市化によって米国内の湿潤地域においても都市下水の利用事例が増加していた (Exall *et al.*, 2008) . 湿潤地域である米国北部における都市下水再利用量は $0.011 \sim 0.014 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$ と見積もられ、主に緑地帯における散水などの飲料水の供給ストレスを減少させる目的に使用されていた (USEPA, 2012) . 米国内の乾燥地および半乾燥地においては、処理都市下水は主に農業用に再利用されていた。農業用途に再利用される都市下水の割合はカリフォルニア州において州内の全再利用の 46%、フロリダ州においては 44% と見積もられた (Bryck *et al.*, 2008) . Jiménez and Asano (2008a) によると米国内における処理都市下水灌漑農地は 1.5 万 ha であった。アリゾナ州、カリフォルニア州、テキサス州およびフロリダ州においては淡水資源のひっ迫が都市下水の再利用の動因として考えられた (USEPA, 2004, 2012) . さらに、カリフォルニア州は農業における再生水の利用を促進するために、「再生水に関する政策 (Recycled Water Policy) 」や「水の再利用に関する基準 (Water Recycling Criteria) 」を適応させていた (USEPA, 2004; SWRCB, 2009) . 米国における都市下水の再利用の動機は USEPA (2004, 2012) および Asano *et al.* (2007) により主に 4 種類挙げられた。1) 淡水資源のひっ迫による競合しない水資源としての利用、2) 「水質汚濁防止法 (the Water Pollution Act) 」および「水質浄化法 (Clean Water Act) 」などによる廃水並びに都市下水の処理水質に関する法律による積極的な処理下水の再利用の促進、3) 急速な都市化並びに都市人口の急増による新しい水資源の輸送費用の増加、つまり、輸送費用をほとんど必要としない都市下水の利用の促進、4) 国民の環境への配慮による社会的圧力の増加が挙げられている。

2.3.2.2. ラテンアメリカ地域

都市下水生成量、処理量および処理下水の再利用量の全側面の報告があったのは、ラテンアメリカ地域の 32 か国中わずか 9 か国であった (表 5) . また、10 か国において都市下水の一部の側面について報告があった。これらのデータの大半は 1996~2002 年に報告されており、データの更新が必要であると考えられた。

表 5 ラテンアメリカ地域における都市下水生成量，処理量および再利用量

国名（略称）	都市下水生成		都市下水処理		処理下水の再利用	
	報告年	生成量 (km ³ yr ⁻¹)	報告年	処理量 (km ³ yr ⁻¹)	報告年	再利用量 (km ³ yr ⁻¹)
アンティグア・ バーブーダ国	–	NA	1990	0.0002	–	NA
アルゼンチン国	1997	3.530	2000	0.104	2000	0.091
ベリーズ国	1994	0.002	–	NA	–	NA
ボリビア国	2001	0.135 ^a	1992	0.034	2008	0.016 ^b
ブラジル国	1996	2.567	1996	0.885	2008	0.009 ^b
チリ国	2011	1.516 ^c	2001	0.048*	2008	0.117* ^b
コロンビア国	2010	2.395 ^d	2010	0.597 ^d	–	NA
コスタリカ国	2000	0.086 ^e	2000	0.005	–	NA
キューバ国	1994	0.502	1994	0.109	–	NA
ドミニカ共和国	2011	0.427 ^f	2000	0.131	2000	0.019
エクアドル国	1999	0.631 ^e	1999	0.158	–	NA
エルサルバドル国	2010	0.097 ^g	2010	0.001 ^g	–	NA
グアテマラ国	1998	0.365	1994	0.006	2008	0.0005 ^a
メキシコ国	2002	13.340	2005	3.110	2000	0.280
ニカラグア国	1996	0.067	2000	0.007	2000	0.001
パナマ国	1998	0.394	–	NA	–	NA
パラグアイ国	2000	0.009 ^e	–	NA	–	NA
ペルー国	2012	0.786 ^h	2012	0.275 ^h	2000	0.019
ベネズエラ国	1996	2.903	–	NA	–	NA
上記 19 か国の合計		29.752		5.470		0.553

特別な記述がない場合は FAO-AQUASTAT (2012) から引用した。

都市下水の生成量，処理量および処理下水の再利用率が利用不可能であった国：バルバドス国，ドミニカ国，グレナダ国，ガイアナ国，ハイチ国，ホンジュラス国，ジャマイカ国，セントクリストファー・ネーヴィス国，セントルシア国，セントビンセント及びグレナディーン諸島国，スリナム国，トリニダード・トバゴ国，ウルグアイ国。

^a ボリビア国の複数の都市の調査 (Marka, 2012) ; ^b Jiménez and Asano (2008a) ; ^c 生活廃水のみ (Navarrete and Viches, 2012) ; ^d Gomez *et al.* (2012) ; ^e 生活廃水のみ (FAO 2011) ; ^f サントドミンゴのみ (Pérez and Montás, 2012) ; ^g サンサルバドル都市近郊地域のみ (Deras, 2012) ; ^h 生活廃水のみ (Tong, 2012)

NA はデータが参照できなかったことを意味する (Not Available) .

* 処理下水の再利用率が処理下水量を超過しているのは，処理下水量が 2001 年であるのに対して，処理下水の再利用率が 2008 年であることに起因する。

利用可能なデータによると、都市下水の生成量は $27.0 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$ であり、このうちのわずか 19 % が処理されていた ($5.1 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$)。この低い処理割合は、ラテンアメリカ地域の国々における公衆衛生環境の発達が十分ではないことに起因すると考えられた。UN (2012) によると、ラテンアメリカ地域 15 国の中 8 개국において、半数以上の住民が下水並びに処理場へ未接続の状態では生活していると報告されている。改良衛生施設の使用人口は都市部において 81% であり、地方は 57% であるが、未だに 1.4 億人以上の住人は施設を利用できる状況にない (WHO and UNICEF, 2012)。過去 20 年間に於いて都市人口は 150% 増加しており、十分な公衆衛生を伴わない急速な都市化は、下流域の汚染問題を引き起こしていると指摘されている (García, 2006)。加えて、この地域における都市人口の増加割合は 2009 年の都市人口と比較して、2025 年に 130% であり、2050 年には 160% になると予測された (FAOSTAT, 2012b)。そのため、政府は国民の健康と環境を保護するために、適切な都市下水処理の運営と衛生施設の普及の更なる圧力を受けていると考えられた。

一方、ラテンアメリカ地域における処理都市下水の再利用はほとんど行われておらず ($0.55 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$)、豊富な水の存在と生成量と処理量との割合が低いことに起因していると考えられた。メキシコ国 (域内の全再利用量の 51%)、チリ国 (同 21%) およびアルゼンチン国 (同 16%) の 3 개국において、ラテンアメリカ地域の再利用量の 88% を占めていた。メキシコ国における処理都市下水の灌漑農地は 7 万 ha である一方、大部分の灌漑農地は未処理の都市下水を使用しており、その面積は 19 万 ha であると見積もられている (Jiménez and Asano, 2008a)。ペルー国も同様な状況であり、1,350 ha が処理都市下水を使用している一方、9,346 ha が未処理の都市下水を利用している。一方、アルゼンチン国およびチリ国における処理都市下水を灌漑利用した農地面積は、アルゼンチン国 (未処理の都市下水 : 2.4 万 ha ; 処理都市下水 : 2 万 ha)、チリ国 {未処理の都市下水 (データが一部混在) : 4 万 ha ; 処理都市下水 : 13 万 ha} であり、同程度もしくは未処理灌漑よりも多かった (Jiménez and Asano, 2008a)。チリ国においては、1992 年まで未処理都市下水の直接的な農業利用が行われていた。しかし、ラテンアメリカ地域における 1992 年のコレラの広範な発生により未処理都市下水の使用は制限された。コレラの大流行によって、チリ国における食料生産のための未処理下水の利用を再考させることになった (Westcot, 1997)。チリ国政府は国民の健康への危険性を減少させるために灌漑方法の変更や農作物の消費キャンペーン、灌漑用水や飲料用水の水質改善等の緊急プログラムを実施した。さらに、サンティアゴ市において生成される全下水を処理するという 1998 年の衛生計画によって、腸チフスやコレラの広がりを抑制することに成功した (USEPA, 2012)。その結

果、処理都市下水を灌漑利用している農地が未処理水利用農地よりも多くなったと考えられた。

ラテンアメリカ地域の中で、水資源賦存量は南アメリカにおいては高い。一方、メキシコ国やペルー国、カリブ海諸国においては水ストレスを被っていると考えられている (Jiménez, 2008)。しかし、全域を考慮するとこの地域の最新の一人あたり水資源賦存量は 3 万 m³ を超えており、世界平均の 8,000 m³ を大きく超えていた。よって、メキシコ国やペルー国、カリブ海諸国を除くラテンアメリカ地域においては、水資源の不足は主要な都市下水の再利用の動因としては可能性が低いと考えられた。主な再利用の動因としては、都市下水の農業利用によって経済的な利益が大きいことだと考えられた。Jiménez (2008) は、この地域において都市下水は都市下水中に含まれる窒素やリンなどの肥料成分が豊富かつその利用が低費用で可能なために、農家は有用な水資源として好んで用いていると報告している。さらに、ラテンアメリカ地域においては、リン酸 (P₂O₅) とカリウム (K₂O) 肥料は 2014 年にはそれぞれの不足量が 350 万 t、410 万 t に達すると予測されている (FAO, 2010)。ラテンアメリカ地域においては、公衆衛生が未発達なため未処理の下水が灌漑水に混入し、灌漑水が高い肥料効果持つことから、土壌改良材としての利用が期待できると考えられた。しかし、未だに急速な都市化と人口の増加を抱えているために公衆衛生は益々厳しい局面へ向かうと予測されており、それゆえ、安価な廃水処理だけでなく、安全な都市下水の再利用のためにも、目的に応じた都市下水の処理の施設の整備はよい選択肢となりえると考えられた。

2.3.2.3. ヨーロッパ地域

ヨーロッパ地域 35 か国における都市下水の生成量、処理量および処理下水の再利用率は、10 か国において全ての側面が参照可能であった (表 6)。ほとんどのデータが 2000 年以降に報告されていた。都市下水のいずれかのデータが使用可能であった国は多く、いずれのデータも利用できなかったのは 4 か国 (アルバニア国、フィンランド国、アイスランド国およびノルウェー国) だけであった。

ヨーロッパ地域における都市下水の処理割合は生成量の 66% に相当した。特に、イタリア国やイギリス国、フランス国などの先進国においては 80% を超えていた。この高い処理割合は環境汚染および住民の公衆衛生に対する高い意識と処理技術の発展に起因すると考

表 6 ヨーロッパ地域における都市下水生成量, 処理量および再利用量

国名 (略称)	都市下水生成		都市下水処理		処理下水の再利用	
	報告年	生成量 (km ³ yr ⁻¹)	報告年	処理量 (km ³ yr ⁻¹)	報告年	再利用量 (km ³ yr ⁻¹)
オーストリア国	2009	2.352 ^a	2006	1.061 ^a	—	NA
ベルギー国	2003	1.114 ^a	—	NA	2000	0.003 ^b
ボスニア・ ヘルツェゴビナ国	2011	0.065 ^c	2009	0.003 ^c	—	NA
ブルガリア国	2009	0.462 ^a	2007	0.387 ^a	—	NA
クロアチア国	2011	0.343 ^d	2011	0.267 ^d	—	NA
キプロス国	2005	0.022 [*]	2007	0.245 [*]	2008	0.007
チェコ国	2009	1.248 ^a	2010	0.871 ^e	—	NA
デンマーク国	—	NA	1998	0.802 ^a	—	NA
フランス国	2004	7.910 ^f	2004	6.654 ^f	2004	0.411 ^a
ドイツ国	2007	6.172 ^a	2007	5.213 ^a	2000	0.042 ^b
ギリシャ国	—	NA	2007	0.566	2000	0.023 ^b
ハンガリー国	2004	4.162 ^a	2006	0.414 ^a	—	NA
アイルランド国	—	NA	2007	0.290	—	NA
イタリア国	2007	3.926	2007	3.902	2000	0.233 ^b
コソボ国	2003	0.0002 ^g	—	NA	—	NA
ルクセンブルグ国	2003	0.090	2008	0.040	—	NA
マルタ国	2009	0.020	2003	0.003	2000	0.002 ^b
モナコ国	2009	0.008 ^h	2009	0.006 ^h	—	NA
モンテネグロ国	2009	0.066 ⁱ	2009	0.015 ⁱ	—	NA
オランダ国	1991	1.651 [*]	2009	1.818 ^{*j}	2000	0.008 ^b
ポーランド国	2009	2.198 ^a	2007	1.174 ^a	2000	0.003 ^b

(表 6 続き)

国名 (略称)	都市下水生成		都市下水処理		処理下水の再利用	
	報告年	生成量 (km ³ yr ⁻¹)	報告年	処理量 (km ³ yr ⁻¹)	報告年	再利用量 (km ³ yr ⁻¹)
ポルトガル国	2009	0.577 ^k	2009	0.561 ^k	2000	0.001 ^b
マケドニア国	2010	0.020 ^l	2010	0.020 ^l	–	NA
ルーマニア国	2009	5.120 ^a	2007	0.811 ^a	–	NA
セルビア国	2011	3.499 ^m	2011	0.189 ⁿ	–	NA
スロバキア国	2007	0.580 ^a	1998	0.484 ^a	–	NA
スロベニア国	2010	0.173 ^o	2010	0.146 ^o	–	NA
スペイン国	2007	5.204 ^p	2007	4.570 ^p	2007	0.487 ^p
スウェーデン国	–	NA	2006	0.539 ^a	–	NA
スイス国	2005	1.441 ^a		NA	–	NA
イギリス国 (英国)	2002	4.019	2008	3.806	2008	0.164
上記 32 か国の合計		52.442		34.857		1.384

特別な記述がない場合は FAO-AQUASTAT (2012) から引用した。

都市下水の生成量, 処理量および処理下水の再利用量が利用不可能であった国: アルバニア国, フィンランド国, アイスランド国, ノルウェイ国。

^a EUROSTAT (2013a); ^b AQUAREC (2006); ^c FOSFBH (2012); ^d CROSTAT (2012); ^e CSO (2012); ^f FIE (2012); ^g UNMIK (2003); ^h PMDFEU (2009); ⁱ MONSTAT (2010); ^j Statistics Netherlands (2012); ^k 諸島を除く (NIWP, 2010); ^l 工業廃水のみ (RMSSO, 2011); ^m 冷却水を含む可能性がある。工業用冷却水の取水量は 2011 年に 3.327 km³ であった (SORS, 2012); ⁿ SORS (2012); ^o SORSi (2012); ^p National Statistics Institute, Spain (2012)

NA はデータが参照できなかったことを意味する (Not Available)。

*都市下水処理量が生成量を超過しているのは, 異なる年次に報告されていることに起因すると考えられた。キプロス国の場合, 都市下水処理量の報告が 2007 年であるのに対し, 都市下水生成量の報告は 2005 年であった。同様に, オランダ国の場合, 都市下水処理量の報告が 2005 年であるのに対し, 都市下水生成量の報告は 1991 年であった。

えられた (OECD, 2008 ; UN, 2012) . 加えて, 水質汚染や下水処理に関する法律や条例 {例: 都市廃水指令 (91/271/EEC) } が都市下水の高い処理割合に大きく影響していたと考えられた. また, 多くのデータが利用可能であったのは, 政府の都市下水処理システムに対する高い調査意識が要因の一つといわれている (OECD, 2008 ; UN, 2012) .

Bixio *et al.* (2006) によると, ヨーロッパ地域における再利用プロジェクトは最大の取水産業が異なることによって 2 地域に区分された. 南部ヨーロッパにおいては, 都市下水は主として農業用 (全プロジェクトの 44%) と都市景観用 (37%) に利用されていた. 北部ヨーロッパにおいては, 都市景観用 (全プロジェクトの 51%) , 工業用 (33%) に利用されていた. 南部ヨーロッパの国々においては農業の取水量が多い {ギリシア国 (80%) , ポルトガル国 (78%) , キプロス国 (71%) , スペイン国 (68%) , イタリア国 (45%) } . 一方, 北部の国々は工業が主要な取水産業であった (FAO-AQUASTAT, 2012) . その結果, 取水時期のピークも大きく異なっていた. つまり, 南部ヨーロッパの国々においては, 乾期の終わりに作物が深刻な水ストレスに置かれるため, この時期に灌漑用水の需要が高まる. 北部ヨーロッパの人口密度が高い地域においては, 高い工業用水の需要によって, 年間を通じて水ストレスが生じていると指摘されている (Henrichs and Alcamo, 2001) . さらに, 南部ヨーロッパの国々においては観光業が水ストレスに大きく起因すると考えられた. 2000 年において 3.6 億人が観光に訪れる世界有数の旅行地である地中海地域 (北アフリカ地域を含む) では 2025 年には 6.3 億人に増加すると予測されている (UNEP-MAP-BPRAC, 2005) . マルタ国やキプロス国, スペイン国において, 観光業関連の水使用は国内水需要の年数%と量は少ない (Gössling, 2006) . しかしながら, 観光業の水需要は最も水資源がひっ迫する農業用水の需要ピークと同時期に生じるため, 今後も増加する観光業との調和が新たな課題であると指摘されている (UNEP-MAP-BPRAC, 2005 ; Guardiola-Claramonte *et al.*, 2012) .

ポルトガル国における処理都市下水の灌漑農地は, 下水の滞留時間に依存するが 3.5~10 万 ha の範囲であると大まかに見積もられている (Angelakis and Bontoux, 2001) . キプロス国においては 3.8 万 ha において処理都市下水が使用されている (Jiménez and Asano, 2008a) . イタリア国は処理都市下水の主な再利用は農業用灌漑であり, 4,000 ha を超え, 最近のデータによると, 未処理と処理済みの都市下水灌漑農地は合わせて 2.8 万 ha に到達すると考えられている (Jiménez and Asano, 2008a) .

2.3.2.4. 旧ソビエト連邦諸国

旧ソビエト連邦諸国（15 か国）における都市下水の生成量，処理量および処理下水の再利用量は，8 か国において全ての側面が参照可能であった（表 7）．残りの国は都市下水の一部の側面しか利用できなかった．

ロシア国において処理場を通過する都市下水の量は $14 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$ であり，この 28%しか水質基準を満たしていない（UNDESA-DSD, 2004）．この水質基準を満たす処理割合が低いのは，不十分な管理（60%の処理場は過負荷）と古い設備（38%の処理場は 25～30 年程度運転しており建て替えが必要である）に起因すると考えられている（UNDESA-DSD, 2004）．同様な状況はウクライナ国（WB, 1999）やグルジア国（UNECE, 2003），カスピ海沿岸諸国（Stolberg *et al.*, 2006）を始めとした他の旧ソビエト連邦の国々でも報告されている．旧ソビエト連邦の国々においては古く不適切な管理の処理場による水汚染問題が深刻であるため，処理場の適切な管理および施設の更新のための財政確保が必要であると考えられた．なお，この地域においては都市下水の再利用は情報に乏しかった．そのため，再利用の動機を把握することは困難であった．情報が十分でないことは，この地域において都市下水の再利用の重要性が低い可能性が示唆された．

2.3.2.5. 中東および北アフリカ地域（MENA 地域）

MENA 地域はアルジェリア国およびイラク国を除いた全ての国において都市下水の生成量，処理量および再利用量が参照可能であった．この理由の一つとして，この地域の水資源はひっ迫しており，代替水資源として都市下水の利用が注目かつ実践されているためと考えられた．

MENA 地域の都市下水の生成量は $22.3 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$ であり，このうちの 53%（ $11.9 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$ ）が処理されている（表 8）．この比較的高い処理割合は，多くの MENA の国は発展途上国に分類されるが，経済が発展している産油国においては十分な資源と処理場を持っていることに起因すると考えられている（Qadir *et al.*, 2010b）．

MENA 地域の下水処理効率は地域によって大きく変動し，さらに大半の処理場はこの地域において一般的に処理場に家庭—工業の混合廃水が流入しており，処理場においてはこの種の下水を効率的に処理する能力を持たないと指摘されている（Qadir *et al.*, 2010b）．加えて，都市人口の増加などにより処理場に混入する下水量は設計量を上回っており，多量の都市下水を扱う容量が不足している．その結果，多くの処理場においては都市下水の

表 7 旧ソビエト連邦諸国における都市下水生成量, 処理量および再利用量

国名 (略称)	都市下水生成		都市下水処理		処理下水の再利用	
	報告年	生成量 (km ³ yr ⁻¹)	報告年	処理量 (km ³ yr ⁻¹)	報告年	再利用量 (km ³ yr ⁻¹)
アルメニア国	2011	0.750 ^a	2011	0.115 ^a	2006	0.0001
アゼルバイジャン国	2005	0.659	2005	0.161	2005	0.161
ベラルーシ国	2010	0.990 ^b	2010	0.676 ^b	–	NA
エストニア国	2009	0.379 ^c	2007	0.104 ^c	–	NA
グルジア国	–	NA	2005	0.009	–	NA
カザフスタン国	1993	1.833	1993	0.274	2000	0.274
キルギスタン国	2006	0.701 ^d	2006	0.148 ^d	2000	0.0001
ラトビア国	2009	0.282 ^e	2009	0.128 ^e	2000	0.012
リトアニア国	2009	0.263 ^c	2007	0.161 ^c	1995	0.005
モルドバ国	2011	0.686 ^f	2011	0.122 ^f	–	NA
ロシア国	2007	9.327* ^g	2002	14.000* ^h	–	NA
タジキスタン国	2008	0.092	2008	0.089	–	NA
トルクメニスタン国	2010	1.275	2004	0.336	2004	0.336
ウクライナ国	2011	8.044 ⁱ	2011	1.763 ⁱ	–	NA
ウズベキスタン国	2001	2.200 ^j	2001	2.069 ^j	1994	0.205
上記 15 か国の合計		27.481		20.155		0.993

特別な記述がない場合は FAO-AQUASTAT (2012) から引用した。

^a NSSRA (2012) ; ^b NSCRB (2011) ; ^c EUROSTAT (2013a) ; ^d UNECE (2009) ; ^e CSBL (2011) ; ^f 値は生活 (Sewage) および鉱山廃水並びに地下水を含む (NBSRM, 2012) ; ^g 値はいくつかの産業からの廃水の予測値の合計である (MNRERF, 2009) ; ^h UNDESA-DSD (2004) ; ⁱ SCSU (2012) ; ^j 冷却水を含む工業廃水 (UNECE, 2001)

NA はデータが参照できなかったことを意味する (Not Available) .

*都市下水処理量が生成量を超過しているのは, 異なる年次および異なる都市下水の定義を用いた複数の機関の報告に起因すると考えられた.

表 8 中東および北アフリカ地域における都市下水生成量，処理量および再利用量

国名（略称）	都市下水生成		都市下水処理		処理下水の再利用	
	報告年	生成量 (km ³ yr ⁻¹)	報告年	処理量 (km ³ yr ⁻¹)	報告年	再利用量 (km ³ yr ⁻¹)
アルジェリア国	2010	0.730	2010	0.150	–	NA
バーレーン国	2010	0.084	2005	0.062	2005	0.016
エジプト国	2011	8.500	2011	4.800	2011	0.700
イラン国	2010	3.548 ^a	2010	0.821 ^a	2010	0.328
イラク国	2012	0.580 ^b	2012	0.580 ^b	–	NA
イスラエル国	2007	0.500	2007	0.450	2004	0.262
ヨルダン国	2008	0.180	2011	0.115 ^c	2012	0.108 ^c
クウェイト国	2008	0.254	2005	0.250	2002	0.078
レバノン国	2003	0.310	2006	0.004	2005	0.002
リビア国	1999	0.546	1999	0.040	2000	0.040
モロッコ国	2010	0.700	2010	0.124	2008	0.070
オマーン国	2000	0.090	2006	0.037	2006	0.037
パレスチナ自治政府	2001	0.071 ^d	2001	0.030 ^d	1998	0.010
カタール国	2005	0.055*	2006	0.058*	2005	0.043
サウジアラビア国	2000	0.730	2002	0.548	2006	0.166
シリア国	2002	1.364	2002	0.550	2003	0.550
チェニジア国	2010	0.246	2010	0.226 ^e	2001	0.021
トルコ国	2010	3.582 ^f	2010	2.719 ^f	2006	1.000
アラブ首長国連邦	1995	0.500	2006	0.289	2005	0.248
イエメン国	2000	0.074	1999	0.046	2000	0.006
上記 20 か国の合計		22.644		11.899		3.685

特別な記述がない場合は FAO-AQUASTAT（2012）から引用した。

^a 生活廃水のみ（Tajrishy, 2012）；^b Aziz and Aws（2012）；^c Ulimat（2012）；^d PECDR（2001）；^e Saloua

(2012) ;^f TURKSTAT (2012) ;

NA はデータが参照できなかったことを意味する (Not Available) .

* 都市下水の処理量が都市下水生成量を超過しているのは、処理下水量が 2006 年であるのに対して、都市下水の生成量が 2005 年であることに起因すると考えられた。

表 9 サブサハラアフリカ地域における都市下水生成量, 処理量および再利用量

国名 (略称)	都市下水生成		都市下水処理		処理下水の再利用	
	報告年	生成量 (km ³ yr ⁻¹)	報告年	処理量 (km ³ yr ⁻¹)	報告年	再利用量 (km ³ yr ⁻¹)
ボツワナ国	2000	0.043	1999	0.008	–	NA
ブルキナファソ国	2000	0.001	–	NA	–	NA
コートジボワール国	–	NA	1994	0.0001	–	NA
ジブチ国	–	NA	–	NA	2000	0.0001
エリトリア国	2000	0.018	–	NA	–	NA
エチオピア国	2009	0.049 ^a	–	NA	2009	0.009 ^a
ガーナ国	2006	0.280 ^b	2006	0.022 ^b	–	NA
レソト国	2012	0.007 ^c	–	NA	–	NA
モーリタニア国	–	NA	1998	0.0007	2000	0.0007
モーリシャス国	–	NA	2012	0.039 ^d	2006	0.015 ^d
ナミビア国	2012	0.013 ^e	–	NA	2000	0.007
セネガル国	2010	0.067 ^f	2010	0.015 ^g	2010	0.002 ^f
セーシェル国	2003	0.009	2003	0.0009	2003	0.000006
南アフリカ国	2000	3.200	2000	3.200	2008	0.030 ^h
スワジランド国	2002	0.012	2002	0.009	–	NA
ウガンダ国	2012	0.008 ⁱ	–	NA	–	NA
上記 16 か国の合計		3.707		3.295		0.064

特別な記述がない場合は FAO-AQUASTAT (2012) から引用した。

都市下水の生成量，処理量および処理下水の再利用量が利用不可能であった国：アンゴラ国，ベナン国，ブルンジ国，カメルーン国，カーボヴェルデ国，中央アフリカ国，チャド国，コモロ国，コンゴ共和国，コンゴ民主共和国，赤道ギニア国，ガボン国，ガンビア国，ギニア国，ギニアビサウ国，ケニア国，リベリア国，マダガスカル国，マラウイ国，マリ国，モザンビーク国，ナイジェリア国，ニジェール国，ルワンダ国，サントメ・プリンシペ国，シエラレオネ国，ソマリア国，スーダン国（南スーダン国を含む），タンザニア国，トーゴ国，ザンビア国，ジンバブエ国．

^a エチオピア国の首都アディスアベバのみ（van Rooijen *et al.*, 2010）；^b ガーナの都市部の生活廃水のみ（Gyampo, 2012）；^c Lekhooana（2012）；^d Joysury *et al.*（2012）；^e ナミビア国の首都ウィントフックのみ（Moyo, 2012）；^f Kayizzi *et al.*（2012）；^g セネガル国の首都ダカールのみ（Souare *et al.*, 2012）；^h Jiménez and Asano（2008a）；ⁱ Souare *et al.*（2012）．

NA はデータが参照できなかったことを意味する（Not Available）．

処理過程の滞留時間を短縮させているため、処理が有効的に働いていないと指摘されている (Qadir *et al.*, 2010b) .

処理都市下水の再利用は水ストレス条件下の MENA 地域において重要な戦略になると考えられた。この地域のいくつかの政府は処理下水の利用を促進している (USEPA, 2004, 2012) . 例えば、サウジアラビア国においては 2016 年には都市下水の利用を 65%に高めるように計画されており、イスラエル国においては既に家庭からの下水の約 70%が再利用されている (USEPA, 2012) .

この地域の高所得国において処理下水は農業利用だけではなく、都市景観のための樹木などの植生への灌漑にも利用されている。アラブ首長国連邦において処理都市下水の灌漑面積は 1.7 万 ha であり、都市の樹木や公共の公園、道路沿いの樹木や草本への灌漑面積が 1.5 万 ha に及ぶといわれている (USEPA, 2004 ; Jiméñz and Asano, 2008a) . クウェイト国の都市部においては景観用樹木などの灌漑が増加しているが主要な再利用は農業用灌漑であり、全灌漑農地の 25% (4,470 ha) で使用されている (USEPA, 2004) . クウェイト国においては処理下水の灌漑利用は加熱野菜作物 (ジャガイモやカリフラワーなど) , 工芸作物および飼料作物 (アルファルファや大麦など) 並びに高速道路の景観用植生にのみ限定されている。イスラエル国において、処理下水の再利用面積は 2.8~6.5 万 ha の幅を持っている (Jiméñz and Asano, 2008a) . 都市下水の再利用はイスラエル国の全水供給量の 10%に相当し、全灌漑用水の 20%に相当する (USEPA, 2004) . エジプト国の未処理水灌漑農地は少なくとも 4,500 ha あるが、大半の都市下水灌漑農地は処理済みの排水を使用しており、4.2 万 ha に相当する (Jiméñz, 2006) . 一方、FAO (2005) によると、エジプト国の都市下水灌漑農地は 22 万 ha に及ぶと報告されている。シリア国における処理都市下水の灌漑農地は 9,000 ha であるが、都市下水灌漑農地の大半 (4 万 ha) は未処理水を用いている (Jiméñz and Asano, 2008a) . モロッコ国の都市下水灌漑農地も未処理もしくは不十分な処理の灌漑水を主に利用し、8,000 ha に及ぶと報告されている (USEPA, 2004) .

MENA 地域の今後の気候条件は気候変動政府間パネル (IPCC, 2007) によると、気候変動は降水量の減少 (-25~-10%) , 土壌水分の減少 (-10~-5%) および表面流去水の減少 (-40~-10%) 並びに蒸発量の増加 (+5~+20%) をもたらすと予測している。さらに、気温の上昇による地表水の貯水池や土壌からの蒸発の増加、植生地域における高い蒸発散量は表面流去水の減少と地下水の涵養率の低下をもたらし、農業における作物の水要求量の増加を引き起こすと予測されている (Trenberth *et al.*, 2003) . これらの変化は季節的な降

水や脆弱な帯水層，少数の河川に依存する MENA 諸国においては新しくかつより困難な水管理条件になると考えられた．その結果，この地域の経済発展は水資源の確保や搬送，消費方法により敏感に成り得ると示唆された．そのため，都市下水の再利用はこの地域においては特に重要であると考えられた．この地域においても都市下水を農業利用するには，適切な処理をした都市下水の利用が必要である（Qadir *et al.*, 2010b）．MENA 地域の産油国や一部の国（イスラエル国，ヨルダン国，チュニジア国など）のように都市下水の処理場が十分に整備されかつ法や基準の強制力を持つ国において，処理下水の農業利用は大いに発展すると考えられている（Bahri, 2008; Qadir *et al.*, 2010b）．しかし，多くの国においては現在においても都市下水処理場が十分ではなく，その結果，未処理もしくは不十分な処理の都市下水の農業利用は今後も継続すると考えられた．このような適切な処理を伴わない都市下水の農業利用は，細菌などによる水系感染症の拡大や長期的には重金属汚染が懸念される（Habbari *et al.*, 2000; Qadir *et al.*, 2010b）．しかし，このような都市下水の灌漑利用が環境に与える影響評価は十分されているとは言えず，特に長期間の利用に伴う重金属の影響はほとんど明らかになっていない．さらに，シリア国などの一部の国においては都市下水の灌漑利用の環境影響評価は全く利用できない状況である．これらの影響評価はこの地域に共通の都市下水利用の取り組みや管理，政策や法整備，基準の策定，運用へ大きな発展をもたらすと考えられた．よって，この地域においては適切な処理を行った都市下水の農業利用を進める一方，処理が十分に行われていない下水を利用する場合の管理や運用法の優先順位を経済や農業，環境，疫学的な側面から明らかにし，対応していく必要があると考えられた．

2.3.2.6. サブサハラアフリカ地域

サブサハラアフリカ 48 か国のうち，都市下水の全側面（生成，処理，再利用量）の報告があった国はセネガル国とセーシェル国，南アフリカ国のわずか 3 か国だけであった（表 9）．しかし，南アフリカ国およびセーシェル国の報告は古く，2000～2003 年の報告であった．いずれかの側面の報告があった国は 13 か国であり，報告がなかった国は 32 か国にも及んでいる．報告が少ない理由として，この地域には世界の 70% の後発発展途上国が集中しており（FAO, 2005），報告体制が十分に整っていないためと考えられた．

ほとんどの都市下水は未処理のまま環境中に放出されているため，コレラや下痢性疾患などの水疾患の広がる原因の一つであると考えられている（WHO, 2007, 2008）．加えて，この地域の都市下水の利用はほとんどが未処理水を使用しており，ガーナ国のクマシ

市 (Keraita *et al.*, 2002) やセネガル国のダカール市 (Faruqui *et al.*, 2004) , ケニア国のナイロビ市 (Cornish and Kielen, 2004) , ジンバブエ国のブラワーヨ市 (Mutengu *et al.*, 2007) などの報告例がある。クマシ市の都市周辺地域において、1.2 万 ha の都市近郊灌漑農地が未処理の都市下水を使用している (Keraita *et al.*, 2002) 。ガーナ国の都市とその近郊において、都市下水の利用によって野菜農家の収入は貧困ライン (1998/1999 年 : 約 US\$300~380 yr⁻¹) より上回ると指摘されている (Danso *et al.*, 2002) 。

世界の耕作地の 14%がこの地域に存在するが、肥料の使用は限られている。窒素肥料の使用量 (N 換算) は 130 万 t (世界の 1.3%) であり、リン酸肥料 (P₂O₅ 換算) は 56 万 t (同 1.5%) , カリウム肥料 (K₂O 換算) は 38 万 t (同 1.4%) にすぎない (FAOSTAT, 2012a) 。これらの少ない施与量の原因には都市下水に含まれる養分による寄与が部分的に存在すると考えられた。しかし、農家が未処理の都市下水を灌漑に使用する場合、都市下水の水質および養分が不確かであることから、施与肥料量を最適化することは難しいと考えられた。

2.3.2.7. オセアニア地域

オセアニア地域において、都市下水の全側面 (生成, 処理, 再利用量) の報告があった国はオーストラリア国だけであった (表 10) 。ニュージーランド国においては処理都市下水量の報告が利用可能であったが、生成量は未報告であった。Bixio *et al.* (2006) によると、オセアニア地域で行われた 450 の都市下水の再利用事業のうち約 45%の事業が農業利用を行っていた。オーストラリア国においては年 0.35 km³ の処理下水が再利用されている。国内の都市下水処理量の 19%にあたり、全取水量の 4%に相当すると見積もられている (ABS, 2010) 。オーストラリア国において、農業は都市下水利用の恩恵を最も受けている産業であり、2 万 ha の灌漑農地において利用されている (USEPA, 2004) 。都市下水の農業利用は水資源のひっ迫する農村や灌漑需要の多い農村地域において、より一般的に行われている (Anderson *et al.*, 2008) 。ニュージーランド国における都市下水はゴルフ場の灌漑や工業用に利用されているが、事業並びに再利用量は小規模である (Anderson *et al.*, 2008) 。MENZ (2003) によると、ニュージーランド国における他の都市下水の再利用は、地域資源の有効活用意識の高まりによって主に沿岸の小さな町や人口密度の低い村落において行われていると報告されている。

表 10 オセアニア地域における都市下水生成量，処理量および再利用量

国名（略称）	都市下水生成		都市下水処理		処理下水の再利用	
	報告年	生成量 (km ³ yr ⁻¹)	報告年	処理量 (km ³ yr ⁻¹)	報告年	再利用量 (km ³ yr ⁻¹)
オーストラリア国	2008	2.094 ^a	2008	1.779 ^a	2008	0.348 ^a
ニュージーランド国	—	NA	2012	0.548 ^b	—	NA
上記2か国の合計		2.094		2.327		0.348

都市下水の生成量，処理量および処理下水の再利用量が利用不可能であった国：フィジー国，ソロモン諸島国

NA はデータが参照できなかったことを意味する（Not Available）。

^a ABS（2010）

^b 生活廃水のみ（MENZ, 2012）

2.3.2.8. アジア地域

アジア地域において、中国や日本をはじめとした 5 ヶ国の都市下水の全側面（生成，処理，再利用量）の報告がある一方，14 か国においていずれかの都市下水量の側面が利用可能であった（表 11）。

アジア地域においては都市下水生成量のわずか 32%しか処理されておらず，いくつかのアジア諸国においては都市下水処理施設が不足していることが原因である（WEPA-IGES, 2012）。各国の都市下水を管轄する省庁に行った聞き取り調査によると，都市下水管理における最も一般的な制限要因は財政問題であり，21 か国中 19 か国が該当する。次いで明瞭な政策および適任の労働者の不足が挙げられている（UN, 2000）。

日本は処理された都市下水の再利用に対し他国と異なる戦略を持っている（Funamizu *et al.*, 2008）。2009 年における処理下水の再利用量は $0.2 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$ であり，景観用（全再利用量の 29%），親水（3%）および河川の流量維持目的（29%）の環境利用に半数以上（計 61%）が使用されていた（国土交通省, 2012）。農業および工業は都市下水の再利用は 10%以下と主要な再利用産業ではない（国土交通省, 2012）。加えて，トイレの洗浄用に全体の 3.5%が再利用されていた（国土交通省, 2012）。歴史的にみると，日本の都市下水の再利用は農業利用よりも直接的に都市の水需要を満たすために行われてきた（USEPA, 2004）。そのため，日本は都市の水需要を緩和するための良い再利用モデルを提供できると考えられた。

中国においては，処理および未処理の都市下水を灌漑している農地は少なくとも 130 万 ha であると試算されている。ベトナム国においては 9,500 ha が未処理の都市下水を灌漑利用している（Jiménez and Asano, 2008a）。Raschid-Sally *et al.* (2004) によると，ベトナム国において少なくとも市街地近郊の農地の 2%において利用され，その大半が稲作であった。パキスタン国においては全国的な都市下水の使用に関する調査により，3.3 万 ha において直接灌漑していることを明らかにした（Ensink *et al.*, 2004）。パキスタン国において処理される都市下水の割合はごくわずかであり，都市下水の利用を可能とする法令も存在しないことが明らかになっている（van der Hoek, 2004）。未処理の都市下水の直接的な再利用はインド国において一般的であり，1985 年には都市下水の灌漑農地は 7.3 万 ha であった。インド国における都市下水の排出量およびその農業への再利用量は劇的に増加している（USEPA, 2004）。近年，ムシ川流域に 4 万 ha 灌漑農地が存在しており，それゆえ，インド国内において 7.3 万 ha を超える都市下水灌漑農地が存在すると指摘されている（van der Hoek, 2004）。アジア地域においては，都市下水の利用並びに下水の水質への混

表 11 アジア地域における都市下水生成量，処理量および再利用量

国名（略称）	都市下水生成		都市下水処理		処理下水の再利用	
	報告年	生成量 (km ³ yr ⁻¹)	報告年	処理量 (km ³ yr ⁻¹)	報告年	再利用量 (km ³ yr ⁻¹)
バングラデシュ国	2000	0.725 ^a	–	NA	–	NA
ブータン国	2000	0.004 ^a	–	NA	–	NA
カンボジア国	2000	1.184 ^b	1994	0.0002	–	NA
中国	2009	58.920 ^c	2006	17.890	2005	13.390
インド国	2012	13.999 ^d	2012	4.302 ^d	2000	0.450 ^e
日本	2009	27.000 ^f	2009	14.650 ^g	2009	0.204 ^g
ラオス国	2000	0.546 ^b	–	NA	–	NA
マレーシア国	2000	1.403 ^a	1995	0.398	–	NA
モルディブ国	2000	0.004 ^a	–	NA	–	NA
モンゴル国	2002	0.126 ^h	2002	0.083 ^h	–	NA
ミャンマー国	2000	0.017 ^a	–	NA	–	NA
ネパール国	2006	0.135 ⁱ	2006	0.006 ⁱ	–	NA
パキスタン国	2011	6.849 ^j	2011	0.548 ^k	–	NA
フィリピン国	2000	7.500 ^l	1993	0.010	–	NA
韓国	2000	6.895 ^a	1996	4.180	2008	0.157 ^m
シンガポール国	2000	0.470 ^a	–	NA	2008	0.027 ^m
スリランカ国	2000	0.950 ^a	–	NA	–	NA
タイ国	2008	5.293	1995	0.035	–	NA
ベトナム国	2003	1.100	2009	0.070	2003	0.175
上記 19 か国の合計		133.120		42.172		14.403

特別な記述がない場合は FAO-AQUASTAT（2012）から引用した。

都市下水の生成量，処理量および処理下水の再利用量が利用不可能であった国：アフガニスタン国，ブルネイ国，北朝鮮，インドネシア国，パプアニューギニア国，東ティモール国。

^a UN (2000) ; ^b 1人あたりの水消費量 (230 L) を基に 2000 年における人口から算出した生活廃水の推定値 (Kamal *et al.* 2008) ; ^c MEPPRC (2010) ; ^d Kaur *et al.* (2012) ; ^e Shrivastava and Swarup (2000) ; ^f 生活用水および従業員 4 人以上の事業所の淡水補給量の合計 (国土交通省, 2012) ; ^g 国土交通省 (2012) ; ^h Basandorj (2002) ; ⁱ Nyachhyon (2006) ; ^j Murtaza (2012) ; ^k 都市下水生成量に対する処理割合が 8% であることから算出した (Murtaza, 2012) ; ^l 生活廃水のみ (UN, 2000) ; ^m Jiménez and Asano (2008a)

NA はデータが参照できなかったことを意味する (Not Available) .

入が生じている一方、都市下水を利用している灌漑農地の面積などの基本情報が不足していた。

FAO（2010）によると、東アジアにおける肥料の需給バランスは、カリウム肥料において 2014 年まで需要を大きく下回る供給状態にあると予測している。この予測は南アジアにおいて、もっと厳しい状況であり、肥料の消費は速いペースで増加を続けている。南アジアにおける窒素、リン酸、カリウム肥料は予測の終了する 2014 年において窒素肥料（N 換算）430 万 t、リン酸肥料（ P_2O_5 換算）740 万 t、カリウム肥料（ K_2O 換算）510 万 t の量がそれぞれ不足すると見積もられている。これらの肥料の需要と供給の差の一部は都市下水中の養分によって賄うことができるため、政策決定者や科学者による効果的な技術的解決策、適切な制度および実効性のある規制の確立が必要であると考えられた。

2.4. 結論

先進国においては厳しい水質基準を設定し適切な下水処理をおこなうことで、処理都市下水を再利用していた。しかし、その動機は良質な水に対する工業用水と生活用水の競合や市民の水に対する意識への変化によって生じていたと考えられた。北アメリカの東部や北部ヨーロッパ、日本などの先進国の湿潤地域においては、農業よりも工業目的や都市の樹木への灌漑などの様々な目的に利用されていた（表 12）。その一方、北アメリカの西部や南部ヨーロッパ、オーストラリア国などの先進国の乾燥地域においては、良質水の農業用水と生活用水、観光業用水の競合により、処理水は主に農業利用されていた。発展途上国においては不十分な下水処理のため、都市下水中に豊富な肥料成分が含まれており、水が豊富にある場合でも農家はその肥料成分と経済的な利点によって灌漑利用を積極的に行っていた。その中であって、MENA、サブサハラアフリカおよびアジア地域においては人口の急増と経済状況の改善に伴い、水の競合はさらに激化すると予測されている。特に MENA は最も厳しい水不足地域であり、都市下水の農業利用の更なる増加が示唆された。

表 12 先進国および発展途上国の湿潤地および乾燥地における都市下水の再利用の動機 並びに主要な再利用産業

		湿潤地	乾燥地
先進国	代表的な地域	アメリカ東部, 北ヨーロッパ, 日本	アメリカ西部, 南ヨーロッパ
	動因	厳しい排出規制, 十分な処理, 環境保護の高まり	
	主要な水の競合 再利用産業	生活と工業用水の競合 農業以外にも使用	農業と生活, 観光産業間の競合 主に農業用
発展途上国	代表的な地域	ラテンアメリカ, アジア	中東および北アフリカ
	動因	農業と非農業間における水の競合, 不十分な公衆衛生, 窒素やリンなどの養分が豊富に含まれること	
	主要な水の競合 再利用産業	農業と非農業間における水の競合 主に農業用	
	再利用の動機	都市下水が唯一の水資源, 肥料の削減, 都市下水利用が安価 (良質な地下水と比較して), 収入の増加 (1年間利用できる, 野菜などの高収益作物の栽培機会の増加)	

第3章 世界の都市下水の生成量および処理量の推定

3.1. 緒言および目的

乾燥地のような水資源の限られている地域においては良質な水の競合が生じており、すでに農業用水および生活用水、工業用水間の水資源の再配分が喫緊の課題となっている。農業用水の代替水資源として、都市下水は有望であると考えられている。都市人口の急増や急速な都市化、経済発展、生活水準の向上によって、非農業産業への水使用が増加すると同時に、そこからの廃水量が増える傾向にある。そのため、多くの発展途上国においては再処理した都市下水を農業用水に利用することは、魅力的な選択肢であると考えられている。

効率的な水資源管理のためには、都市下水から水資源への変換可能な存在量を把握する必要があると考えられる。さらに、世界各地の河川において、無機成分の水質濃度を指標として用い、都市下水の生成量および処理量から環境への水質汚染の危険性や都市下水の灌漑農地への養分供給量を算出することができると考えられる。しかし、第2章からも明らかなように、現状においては各国における都市下水の生成量および処理量のデータ蓄積は十分ではなく、包括的で一貫したデータは十分とは言えない。

2003年に国際連合教育科学文化機関（UNESCO）が、世界の廃水量の予測を行った（Shiklomanov and Rodda, 2003; UNESCO-WWAP, 2003）。この予測は、農業と家庭・商業、火力・原子力発電を含む工業における、取水量と水消費量（水使用中に大気へ蒸発した取水量の合計）との差から推定したものである（Shiklomanov and Rodda, 2003; UNESCO-WWAP, 2003）。最近、Flörke *et al.* (2012) は、世界の都市下水の生成量や処理量の推定を行った。UNESCO-WWAP（Shiklomanov and Rodda, 2003; UNESCO-WWAP, 2003）およびFlörke *et al.* (2012) による都市下水の生成量や処理量の予測や推定は、取水量や還元水量、消費水量などを用いた水使用モデルから算出されている。これまで、世界並びに各地域における都市下水の生成量と処理量について、社会的な指標から直接推定を行った研究はない。

都市下水の生成量は人口の増加並びに経済発展に伴って増加すると考えられている（Lazarova and Bahri, 2005; Jiménez and Asano, 2008a; Drechsel *et al.*, 2010; Flörke *et al.*, 2012）。また、水資源条件によっても増減するといわれている（Jiménez and Asano, 2008a; Shiklomanov and Rodda, 2003; Drechsel *et al.*, 2010; Flörke *et al.*, 2012）。一方、都市下水の処理量は経済発展や都市下水の生成量、下水道、処理場の普及率などの衛生環境によって変

化すると報告されている (Lazarova and Bahri, 2005; Jiménez and Asano, 2008a; Drechsel *et al.*, 2010) . それゆえ, 本章では, 世界各国の都市下水生成量および処理量を統一的に, かつ多くの国と時期を包括的に把握することを目的とし, 世界各国における引用可能な都市下水生成量と処理量の時系列的な統合および, それらのデータと社会指標を用いて, 各国の都市下水生成量と処理量の推定を行った.

3.2. 材料および方法

3.2.1. 都市下水生成量, 処理量および社会指標の引用元並びにその定義

この研究は, 各国における都市下水の生成量および処理量の利用可能なデータに基づいて行った. データ検索は出版物もしくはインターネット上に公開されているデータを利用した.

各国の都市下水の生成量および処理量は, 国際連合食糧農業機関 (FAO-AQUASTAT, 2012;), 欧州連合の EUROSTAT (2012) , 国際連合の報告書 (UN, 2000) および各国の統計データ (CROSTAT, 2010; NIWP, 2010; CSBL, 2011; CSO, 2012; FIE, 2012; NBSRM, 2012; National Statistics Institute, Spain, 2012; SCSU, 2012; Statistics Netherland, 2012; TURKSTAT, 2012) 並びに出版物 (Solley *et al.*, 1998; ADB, 2000; PECDR, 2001; UNECE, 2001, 2004, 2005, 2007, 2009; Basandorj, 2002; MNREPRB, 2002; UNMIK, 2003; UNDESA-DSD, 2004; Butler and Memon, 2006; Nyachhyon, 2006; Bahri, 2008; Jiménez and Asano, 2008a; Kamal *et al.*, 2008; MNRERF, 2009; PMDFEU, 2009; ABS, 2010; Environment Canada, 2010; FOSFBH, 2010; MEPPRC, 2010; MONSTAT, 2010; NSCRB, 2011; RMSSO, 2011; MENZ, 2012; NSSRA, 2012; SORS, 2012; SORSi 2012; 国土交通省, 2012) を利用した.

収集したデータは, 1985 年から 2010 年までの 5 年ごとのデータ (1985, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010 年) を抽出した. 同時期に複数年のデータが利用できる場合は, 上記の報告年を選択した. 例えば, 1990 年から 2005 年まで全ての年において報告がある場合は, 1990, 1995, 2000 および 2005 年のデータを使用した. 上記の報告年 (1985, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010 年) が利用できず, 他の報告年が利用できる場合は, 上記の報告年に最も近い年を参照した. 1994 と 1996 年のように上記の年から同じ期間離れている場合は, より新しい 1996 年を参照した. また, 同時期に異なる機関から報告がある場合は, 1983 ~2012 年の期間において最も参照数の多い機関からの報告を参照した. また, 地域区分は前述の 2.3.2.に従った.

3.2.2. 都市下水生成量の推定アプローチ

既存の都市下水生成量の報告を基に、異なる年代の各国における都市下水生成量を推定した。推定に用いた社会指標は表 13 に示した (CIESIN *et al.*, 2011; FAO-AQUASTAT, 2012; FAOSTAT, 2013b; UNDE-PD, 2013; WB, 2013; WHO-UNICEF-JMP, 2013; WHO, 2013) 。これらの社会指標を基に、統計解析ソフトウェア SPSS (Statistical Package for the Social Science, version 19, IBM, Tokyo, Japan) を適用してステップワイズ変数増加法 ($F > 4$) および強制投入法による重回帰分析を行い、得られた重回帰式から都市下水生成量を推定した。説明変数は欠損値が多いものもあり、全データの 25%以上欠損する場合は、説明変数から除外した。その後、算出したモデルについて、負の値が推定されるモデルや推定適合度の低いモデル、既存の都市下水生成量と比較し明らかに推定の偏りが生じるモデルを除外し、最も偏りが少なくかつ推定適合度の高いモデルを採用した。

推定適合度式 (式 1) を用いて、既存の報告に対する都市下水の生成量と処理量の推定値の適合性を評価した (Vassolo and Döll, 2005) 。推定適合度 (ME) は 1 に近いほど、誤差の小さいモデルである。

$$ME = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (WW_{calculated,i} - WW_{published,i})^2}{\sum_{i=1}^n (WW_{published,i} - WW_{published,i})^2} \quad (\text{式 1})$$

なお、式 1 において、 $WW_{published}$ は各国の都市下水の生成量もしくは処理量 ($\text{km}^3 \text{ yr}^{-1}$) の報告値、 $WW_{calculated}$ は各国の都市下水の生成量もしくは処理量 ($\text{km}^3 \text{ yr}^{-1}$) の推定値、 n は国の数を表している。

3.2.3. 都市下水生成量の推定モデル

都市下水生成量を推定する因子には経済指標、都市人口および年間都市降水総量を使用した。経済指標は以下の式を用いて算出した (UNDP, 2012) 。

$$\text{経済指標 (Income index, II)} = \frac{\ln(\text{GNI PPP}) - \ln(190)}{\ln(76,470) - \ln(190)} \quad (\text{式 2})$$

式 2 において、 \ln は自然対数を表し、GNI PPP は平均購買力平価を示す。190 および 76,470 は、それぞれ 1985~2010 年までの平均購買力平価の最小値と最大値である。

表 13 各国の社会指標の引用元一覧

(CIESIN *et al.*, 2011; FAO-AQUASTAT, 2012; FAOSTAT, 2013b; UNDE-PD, 2013; WB, 2013; WHO-UNICEF-JMP, 2013; WHO, 2013)

人口	全人口, 都市人口, 農村人口, 農業人口, 非農業人口, 労働力人口の絶対数とそれぞれ全人口に占める割合, 都市人口と農村人口比	暫定都市下水生成/処理量, 都市人口と GNI PPP の積	年間都市降水総量
社会発展	HDI, GNI, GNI PPP, GDP, 総都市面積, 都市発展係数, 経済指標, 地域		
水資源	水資源賦存量 ($\text{km}^3, \text{m}^3 \text{ capita}^{-1} \text{ yr}^{-1}$), 降水量 (mm, km^3), 実際の水資源量に占める全産業界の取水割合 (%)		
衛生	<u>改良衛生施設の利用人口と割合, 地域の保健医療従事者数, 5 歳未満児の下痢疾患による死者数, 健康に対する政府支出 (US\$, US\$ capita⁻¹, 全政府支出に占める割合)</u>		

注: 下線は処理量の推定にのみ使用した指標を示す。

略語はそれぞれ人間開発指数 (HDI), 国民像所得 (GNI), 国民総所得購買力平価 (GNI PPP), 国民総生産 (GDP) を表している。

年間都市降水総量は km^3 で表され、以下のデータから式 3 により算出した。

$$\text{年間都市降水総量 (Annual urban precipitation, AUP)} = \text{AP} \times U \times 10^{-6} \quad (\text{式 3})$$

式 3 において、AP は年平均降水量 (mm yr^{-1})、 U は 1990 年における総都市面積 (km^2) を表し、 10^{-6} は mm から km への単位変換のための定数である。

本研究では、85 か国の異なる年次の 169 個のデータを使用した。得られた近似曲線は $y = 556.39x^{2.1738}$ ($r = 0.558$; $p < 0.01$ ^{注3}) で表された (図 6)。1 人あたりの都市下水の生成量は、式 2 で求めた経済指標 (II) との関係性を示す近似曲線から推定した。都市下水の生成量は、人口と経済状況だけではなく、水資源条件によっても増減するといわれている (Jiménez and Asano, 2008b)。そのため、経済状況と都市人口のみを考慮した年間の暫定都市下水生成量 (tmwwp_{est} , km^3) を式 (4) から算出した:

$$\text{tmwwp}_{est} = 556.39 \times \text{II}^{2.1738} \times \text{Pop}_u \times 365 \times 10^{-12} \quad (\text{式 4})$$

式 4 において、556.39 および 2.1738 は得られた近似曲線の定数項であり (図 7)、II は経済指標を、 Pop_u は都市人口、 365×10^{-12} は $\text{km}^3 \text{ yr}^{-1}$ に単位変換するための定数である。

都市下水の生成量の推定値 (MWWP_{est} , $\text{km}^3 \text{ yr}^{-1}$) は、重回帰分析によって求められた式 5 を用いて計算した。

$$\text{MWWP}_{est} = 1.069 \times \text{tmwwp}_{est} + 0.082 \times \text{AUP} + 0.016 \quad (\text{式 5})$$

式 5 において、1.069 および 0.082, 0.016 は重回帰式の偏重回帰係数、 tmwwp_{est} は年間の暫定都市下水生成量 (式 4) を、AUP は年間都市降水総量 (式 3) をそれぞれ示している。なお、重回帰式 (式 5) の決定係数 (R^2) は 0.897 であった。各説明変数の標準偏重回帰係数は、年間都市降水総量で 0.58、年間の暫定都市下水の生成量で 0.40 であった。重回帰式および全ての説明変数は有意 ($p < 0.01$) であった。

注3 有意差検定は経済指標、一人あたりの都市下水生成量および処理量を対数変換した後、Pearson の相関係数 (EXCEL 統計, ver. 6.05a, Esumi Co., Ltd., Tokyo) を統計処理した。

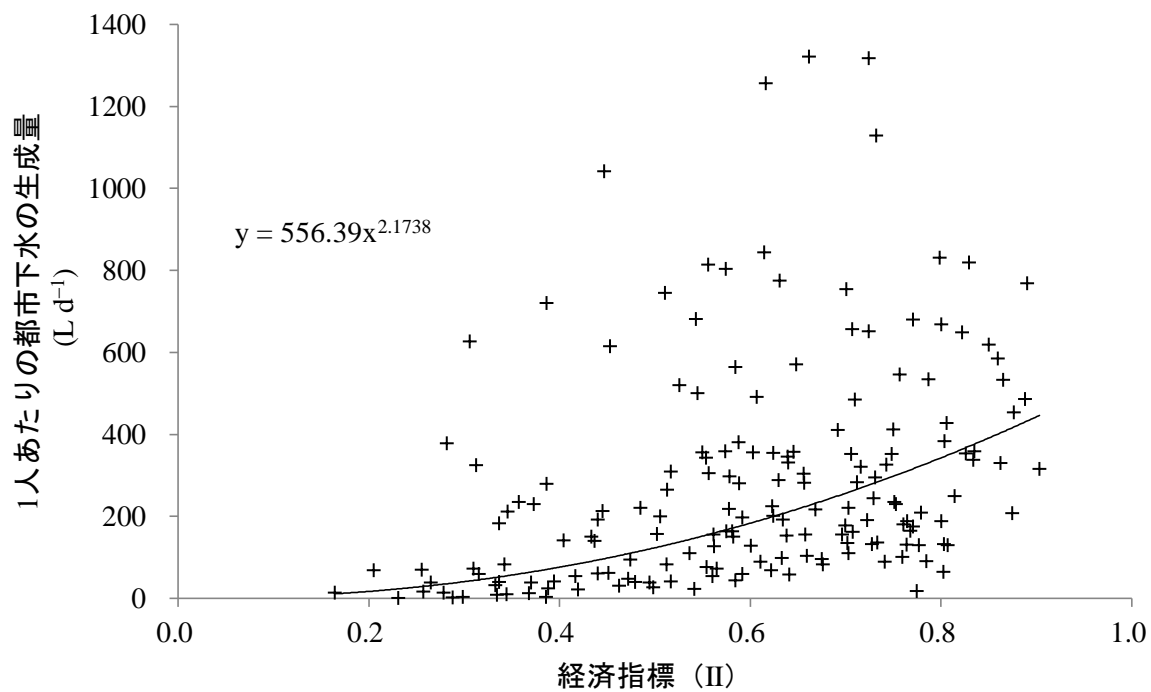


図 6 都市下水生成量および経済指標との関係性

(n=178, 曲線は近似曲線, $r = 0.558^{**}$, $p < 0.01$)

3.2.4. 都市下水処理量の推定アプローチ

既存の都市下水処理量の報告を基に、異なる年代の各国における都市下水処理量を推定した。推定に用いた社会指標は表 13 に示す。これらの社会指標を基に、都市下水生成量と同様に SPSS を適用して、得られた重回帰式から都市下水処理量を推定した。都市下水処理量の推定は、都市下水処理量を常用対数変換もしくは自然対数変換、未変換により行ったが、最も既存データのあてはまりが良くかつ負の値のような明らかに逸脱した推定値を示さない式を本研究において採用した。

3.2.5. 都市下水処理量の推定モデル

都市下水処理量を推定する因子には経済指標 (II) , 都市人口, 衛生施設の普及率および都市発展指数を使用した。経済指標は式 (2) から算出した。

衛生施設の普及率は改良された衛生施設の利用者と不利用者の比率から算出した。

$$\text{衛生施設の普及率 (Sanitation index, SI)} = \frac{S_{\text{improved}}}{S_{\text{improved}} + S_{\text{unimproved}}} \times 100 \quad (\text{式 6})$$

式 6 において、 S_{improved} は改良された衛生施設の利用者数を、 $S_{\text{unimproved}}$ は改良された衛生施設の不利用者数をそれぞれ表している。

都市発展指数に関しては以下のデータから式 7 により算出した。

$$\text{都市発展指数 (Urban development index, UDI)} = \frac{\ln (U)}{\ln (794,416)} \quad (\text{式 7})$$

式 7 において、 \ln は自然対数を、 U は 1990 年における総都市面積 (km^2) を、794,416 は総都市面積の最大値 (米国) をそれぞれ表している。

本研究においては、89 か国の異なる年次の 163 個のデータを使用した。得られた近似曲線は $y = 301.21x^{3.562}$ ($r = 0.578$; $p < 0.01$ ^{注 3}) で表された (図 7) 。 1 人あたりの都市下水の処理量は、式 2 で求めた経済指標 (II) との関係性を示す近似曲線から推定した。都市下水の処理量は都市下水の生成量や衛生環境によって変化すると考えられている (Lazarova and Bahri, 2005; Jiménez and Asano, 2008b; Drechsel *et al.*, 2010) 。 そのため、都市下水生成量と同様に、まず経済状況と都市人口のみを対象とした年間暫定都市下水処理量 ($\text{tmwwt}_{\text{est}}$, km^3) は式 (8) から算出した。

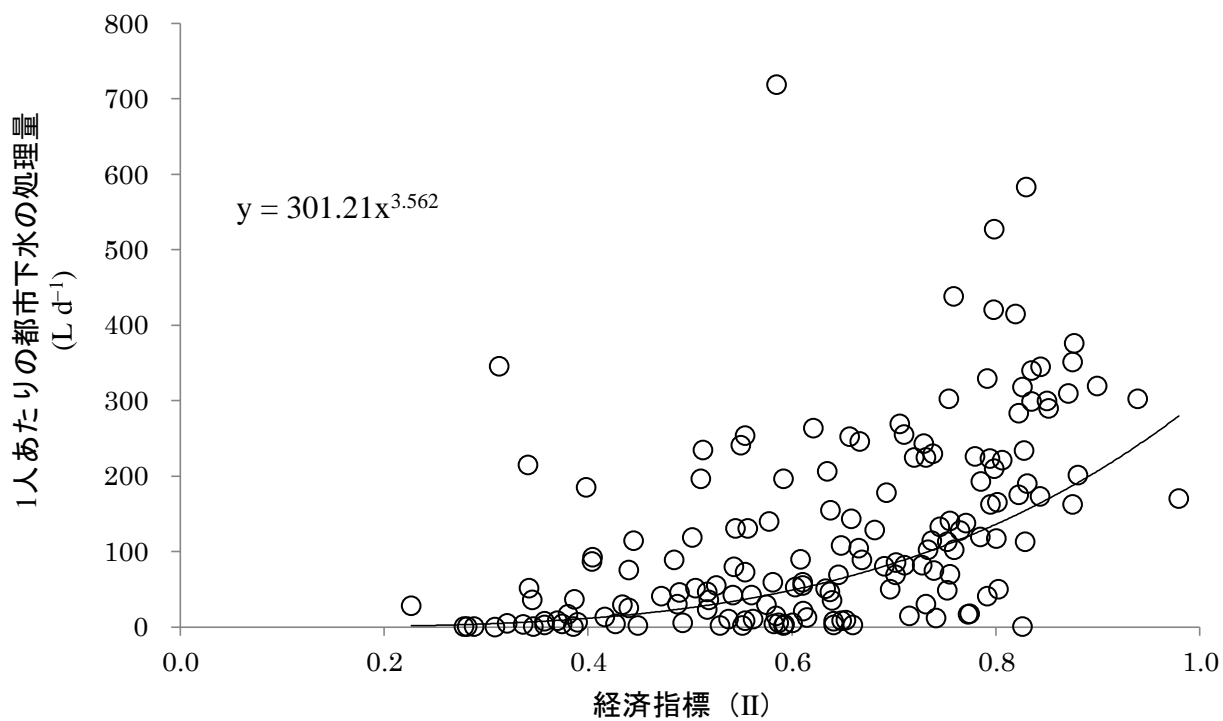


図 7 都市下水処理量および経済指標との関係性

(n=163, 曲線は近似曲線, $r = 0.578^{**}$, $p < 0.01$)

$$tmwwt_{est} = 301.21 \times II^{3.562} \times Pop_u \times 365 \times 10^{-12} \quad (\text{式 8})$$

式 8 において、301.21 および 3.562 は近似曲線の定数項であり（図 7），II は経済指標を， Pop_u は都市人口， 365×10^{-12} は $km^3 yr^{-1}$ に単位変換するための定数である。

都市下水の処理量の推定値 ($MWWT_{est}$, $km^3 yr^{-1}$) は，重回帰分析によって求められた式 (9) を用いて計算した。

$$\ln (MWWT_{est}) = 0.0106 \times tmwwt_{est} + 14.21 \times UDI + 0.029 \times SI - 12.97 \quad (\text{式 9})$$

式 9 において、0.0106 および 14.21, 0.029, -12.97 は重回帰式の偏重回帰係数，ln は自然対数を， $tmwwt_{est}$ は年間の暫定都市下水処理量（式 8）を，UDI は都市発展指数（式 7）を，SI は衛生施設の普及率（式 6）を示している。なお，重回帰式 (9) の決定係数 (R^2) は 0.674 であった。各説明変数の標準偏重回帰係数は，年間の暫定都市下水処理量で 0.084，都市発展指数で 0.726，衛生施設の普及率で 0.245 であった。重回帰式並びに都市発展指数および衛生施設の普及率の式 (9) への寄与の有意水準は $p < 0.01$ であり，年間の暫定都市下水処理量では $p < 0.025$ であった。

なお，都市下水の処理量の推定が生成量の推定を超過した場合は，生成量を処理量としてみなした。

3.3. 結果および考察

3.3.1. 既存の都市下水の生成量および処理量

1983 年から 2012 年の間，都市下水の生成量のデータは 103 か国，処理量のデータは同 97 か国において利用可能であった。都市下水の生成量のデータは 191 点参照でき，その 34% が高所得国からの報告であった（表 14）。同様に，都市下水の処理量は 175 点参照でき，その 26% が高所得国からの報告であった。71 か国のデータ（121 点）において，同時期に都市下水の生成と処理量の両方が利用可能であった。既存の報告だけでは異なる年代の世界の国や地域を一律の基準で比較することは難しいと考えられた。

実際に，1 人あたりの都市下水の生成量は， $0.2 \sim 1,320 L day^{-1}$ と国によって大きく異なっていた。同様に，1 人あたりの都市下水の処理量も， $0.05 \sim 1,027 L day^{-1}$ と国によって大きく異なっていた。発展途上国 53 か国の主要都市における 1 人あたりの水消費量は， $34 \sim 350 L day^{-1}$ である（Raschid-Sally and Jayakody, 2008）。

表 14 期間別における都市下水生成量および処理量のデータ数

	期間						計
	1985 1983～1987	1990 1988～1992	1995 1993～1997	2000 1997～2002	2005 2003～2007	2010 2008～2012	
都市下水							
生成量	5	21	47	56	40	22	191
うち高所得国	2	7	11	15	19	11	65
処理量	2	16	44	57	47	9	175
うち高所得国	0	4	6	12	18	5	45

OECD 加盟国においては、1人あたりの生活用水の消費量は、平均 180 L day^{-1} であった (OECD, 2006) . さらに、アジアやアフリカ、南アメリカの発展途上国の公共用水は $50 \sim 100 \text{ L day}^{-1}$ 供給される一方、水ストレス下にある地域においては通常 $10 \sim 40 \text{ L day}^{-1}$ を超えることはないといわれている (Shiklomanov and Rodda, 2003) . 人間活動による消費量と公的に報告されている都市下水量との間に大きな差があった. とくに、公的に報告されている都市下水の生成量が OECD (2006) や Shiklomanov and Rodda (2003) などの既存の報告よりも概して上回っていた点については、都市下水生成量が生活廃水を含むだけでなく、工業廃水および都市流去水を含んでいるためと考えられた.

3.3.2. 世界の都市下水生成量の推定結果

重回帰式 (式 5) において、年間都市降水総量および年間暫定都市下水の生成量は、都市下水生成量の推定へ有意 ($p < 0.01$) に働いた. 本式の推定適合度は 0.92 であり (図 8) , 都市下水の生成量の報告がない国および年代における都市下水生成量の推定には十分適用可能と判断された.

年間都市降水総量が 2010 年の都市下水の生成量に占める割合は 5%以下から 50%を超える場合があり、その平均値は 37%であった. 都市下水の生成に対する降雨の影響は経時的にも空間的にも大きく変動すると考えられている (CSO, 2012; Environment Canada, 2010) . カナダ国においては 2004 年に都市下水生成量の 5.2%を占めていたが、2006 年には 9.3%であった (Environment Canada, 2010) . 同様に 2008~2010 年のチェコ国の場合、40~50%が雨水であった (CSO, 2012) .

世界の都市下水の生成量は、1990 年には 368 km^3 , 1995 年には 421 km^3 , 2000 年には 460 km^3 , 2005 年には 516 km^3 , 2010 年には 579 km^3 であると推定式 (5) より見積もられた (図 9) .

UNESCO-WWAP の 1995 年の予測値は今回の推定の 3.6 倍 ($1,500 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$) であった (Shiklomanov and Rodda, 2003; UNESCO-WWAP, 2003) . 今回の推定値と UNESCO-WWAP の予測値の大きな開きは、主に都市下水に含まれる廃水の種類の違いに起因すると考えられた. つまり、UNESCO-WWAP の予測においては農業用水と火力・原子力発電用水の廃水が含まれているためである (Shiklomanov and Rodda, 2003; UNESCO-WWAP, 2003) . 火力・原子力発電用水は、主に冷却用に使用されている. 冷却水の取水は、ヨーロッパの国々の中には全取水量の 50%を超える国もあるが (EUROSTAT, 2013b) , 一

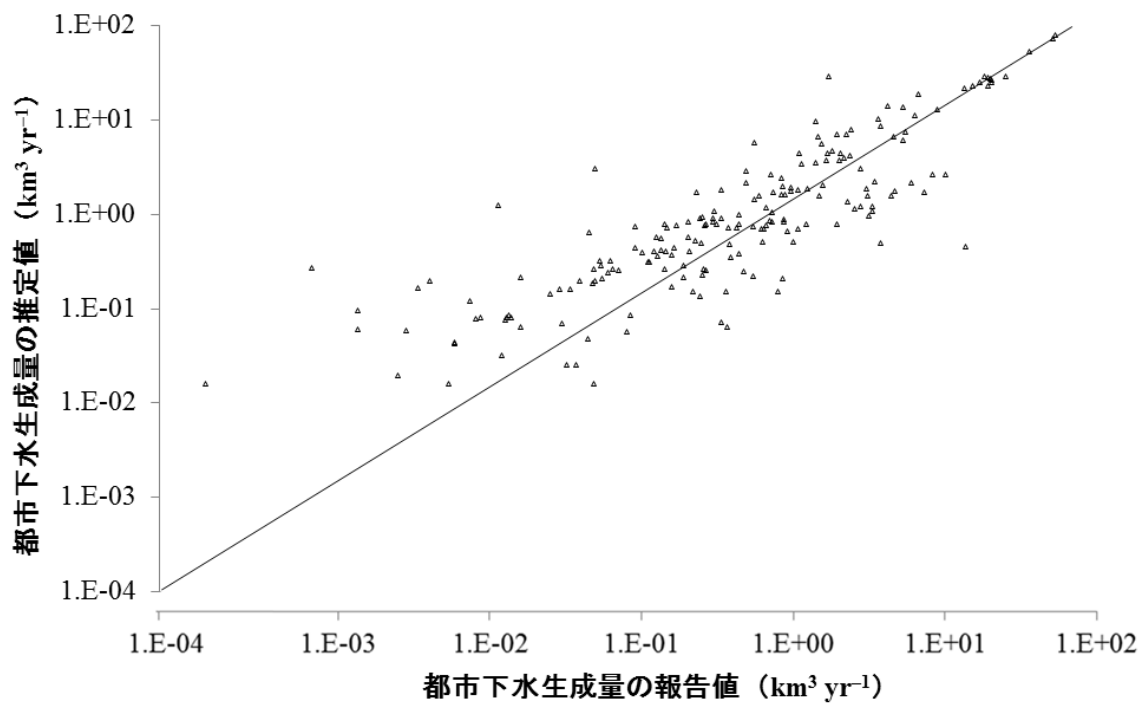


図 8 都市下水生成量の報告値と推定値の比較
(n=169, 直線は 1:1 線, 推定適合度は 0.92)

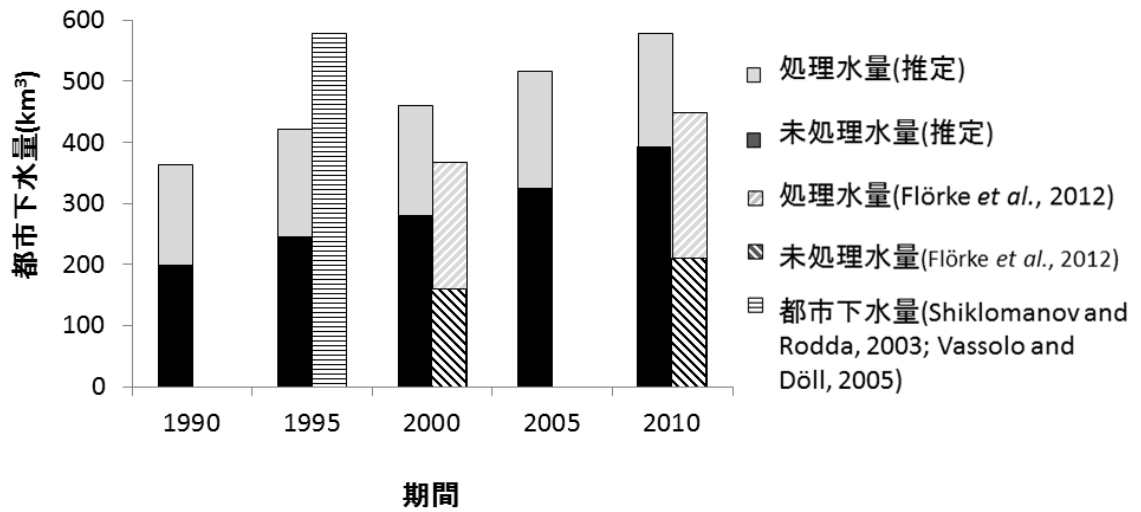


図 9 世界の都市下水の処理水量と未処理水量の推定並びに既存の報告との比較
(Shiklomanov and Rodda, 2003; Vassolo and Döll, 2005; Flörke *et al.*, 2012)

般的に、冷却用水は下水処理過程を経ることなく、他の人間活動に使用できるといわれている (Solley *et al.*, 1997; Vassolo and Döll, 2005; Cornel and Meda, 2008) . つまり、本研究の都市下水の推定において、冷却用水の取水は対象にしないほうがよいと考えられた。

UNESCO-WWAP (Shiklomanov and Rodda, 2003; UNESCO-WWAP, 2003) の予測においては、冷却用水の取水量を個別に算出していない。Vassolo and Döll (2005) によると、1995 年における世界の工業用水の取水量は火力・原子力発電用として $400 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$ 使用される一方、他の工業分野においては $325 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$ であると推定された。水消費量は、それぞれ、 $11 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$ (3%) および $44 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$ (13.5%) と見積もっている (Vassolo and Döll, 2005) . そのため、1995 年の冷却用水 (火力・原子力発電用水) を除いた工業廃水量は、取水量 325 km^3 のうち 281 km^3 と考えられる。なお、1995 年における農業用水の取水量は $2,500 \text{ km}^3$ 、水消費量は $1,750 \text{ km}^3$ と見積もられている (Shiklomanov and Rodda, 2003; UNESCO-WWAP, 2003) . したがって、本論文の推定値と比較すべき既存の値は、UNESCO-WWAP (Shiklomanov and Rodda, 2003; UNESCO-WWAP, 2003) の生活廃水の 1995 年予測値 (298 km^3) に、Vassolo and Döll (2005) の工業廃水 (281 km^3) を合わせた合計 579 km^3 とみなすことができる (図 9) . 本研究の 1995 年における都市下水の生成量 (421 km^3) は、前述の都市下水の 72% に相当した。Flörke *et al.* (2012) によると、Shiklomanov の予測 (2003) は 1995 年以前の経済予測に基づいており、過大評価していると考えられている。

Flörke *et al.* (2012) は世界の都市下水の生成量は 2000 年において 368 km^3 、2010 年において 450 km^3 と推定している。今回の推定は Flörke *et al.* (2012) の推定よりもわずかに高い値であった。この違いは、主にヨーロッパ地域の国における過大評価に起因すると考えられた。EEA (2009) によると、ヨーロッパにおいては、水需要の高い重工業の減少と下水のオンサイト利用のような技術革新によって工業用水の取水は過去 15 年間で減少している。1990~2000 年および 2000~2010 年の都市人口の年間増加率は 1% 程度であり、工業用水の取水量が減少していることを考えると、今回のヨーロッパ地域における都市下水の生成量は過大評価されたと考えられた。

アジア地域は 2010 年において最も多くの都市下水を生成しており、その生成量は全世界の 32% に相当した (表 15) . 他の地域別の下水生成量は、以下の順であった：北アメリカ地域 (全世界の生成量の 18.2%) > ヨーロッパ地域 (同 17.8%) > ラテンアメリカ地域 (同 17.0%) > 旧ソビエト連邦諸国 (同 5.9%) > MENA 地域 (同 4.1%) > サブサハラアフリカ地域 (同 3.7%) > オセアニア地域 (同 1.2%) . 1985~2005 年における順は

表 15 1985～2010 年における地域ごとの都市下水生成量の推定

地域	都市下水生成量 (km ³ yr ⁻¹)						年平均増加率 (%)	
	1985	1990	1995	2000	2005	2010	1990/2000	2000/2010
アジア	97.3	107.1	118.6	131.3	154.3	186.2	2.06	3.56
北アメリカ	75.7	80.7	85.8	93.2	100.1	105.3	1.45	1.23
ラテンアメリカ	68.4	72.5	77.6	82.5	89.5	98.3	1.30	1.77
ヨーロッパ	63.7	71.3	81.9	89.2	96.0	103.0	2.27	1.45
旧ソビエト連邦諸国	–	22.7	21.4	22.4	26.1	34.0	-0.16	4.26
中東および北アフリカ	10.5	12.6	15.4	18.6	24.6	23.5	3.97	2.37
サブサハラアフリカ	12.7	13.9	15.1	16.3	18.4	21.4	1.61	2.76
オセアニア	4.8	5.3	5.6	6.1	6.6	7.2	1.42	1.67
世界	333.3	386.1	421.3	459.6	515.7	578.9	2.38	2.33
推定した国の数	125	145	155	159	165	155		

2010年とほぼ同じであった。旧ソビエト連邦諸国において2000～2010年の年平均増加率が最も高く推移した。これは同時期にロシア国のめざましい経済発展があり、ロシア国はこの地域の下水生成量の60%を担っていた。アジア、サブサハラアフリカ、ラテンアメリカおよびオセアニア地域において年平均増加率は2000～2010年の期間が1990～2000よりも高かった。特に、アジア地域とサブサハラアフリカ地域においては世界平均増加率である年2.3%を超える増加率を示していた。MENA地域は2000～2010年の増加率が1990～2000年と比較して低かったが、2000～2010年の年平均増加率は2.4%と世界平均を上回っていた。そのため、これらの地域における急速な都市下水生成量の増加は下水処理能力が十分に伴っていないと深刻な環境汚染を引き起こす可能性が考えられた。

世界の農業用水の取水量は2003年前後において $2,700 \text{ km}^3$ であった（FAO-AQUASTAT, 2013）。世界の下水の生成量は農業用水の取水量のおおよそ20%に相当すると見積もられた。さらに、世界の半数の国において、生成する都市下水はその国の農業用水の取水量の50%以上を賄うことができると試算された。加えて、都市下水生成量は、2000年に水ひっ迫状態の国（水資源賦存量 $< 2,000 \text{ m}^3 \text{ capita}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ）の農業取水量の約7%を占めると見積もられた。そのため、都市下水は莫大な水資源であり、さらに、水資源がひっ迫している乾燥地においても重要な水資源であると考えられた。

3.3.3. 世界の都市下水処理量の推定結果

重回帰式（式9）において、年間の暫定都市下水処理量、都市発展指数および衛生施設の普及率は都市下水処理量の推定へ有意（ $p < 0.025$ ）に働いた。なお、1985年の推定は衛生施設の普及率に関する統計データが不足していたため、推定不可能であった。推定適合度は0.75であり（図10）、都市下水処理量の報告がない国および年代における都市下水処理量の推定には十分適用可能と判断されたが、いくつかの処理量の多い国において推定値が報告値よりも下回っていた。これらの過小評価の要因として、都市下水処理量のデータのばらつきが多いことが考えられた。全報告データの25%以上が年間の処理量 1 km^3 を超えていた一方で、 10 km^3 以上のデータはわずか5%であり、値が大きく異なっていた。米国において都市下水処理量は年間 50 km^3 であり、続いて、中国がおおよそ 20 km^3 、ロシア国が 14 km^3 、日本が $10 \sim 14 \text{ km}^3$ であった。世界の都市下水処理量は、近年 187 km^3 と推定され、生成量の31%に相当した（図9）。都市下水生成量に占める割合をWB（2012）の経済区分別に見た場合、低所得国においては平均11%、下位中所得国においては13%、上位中所得国においては21%、高所得国においては53%であると推定した。UNESCO-

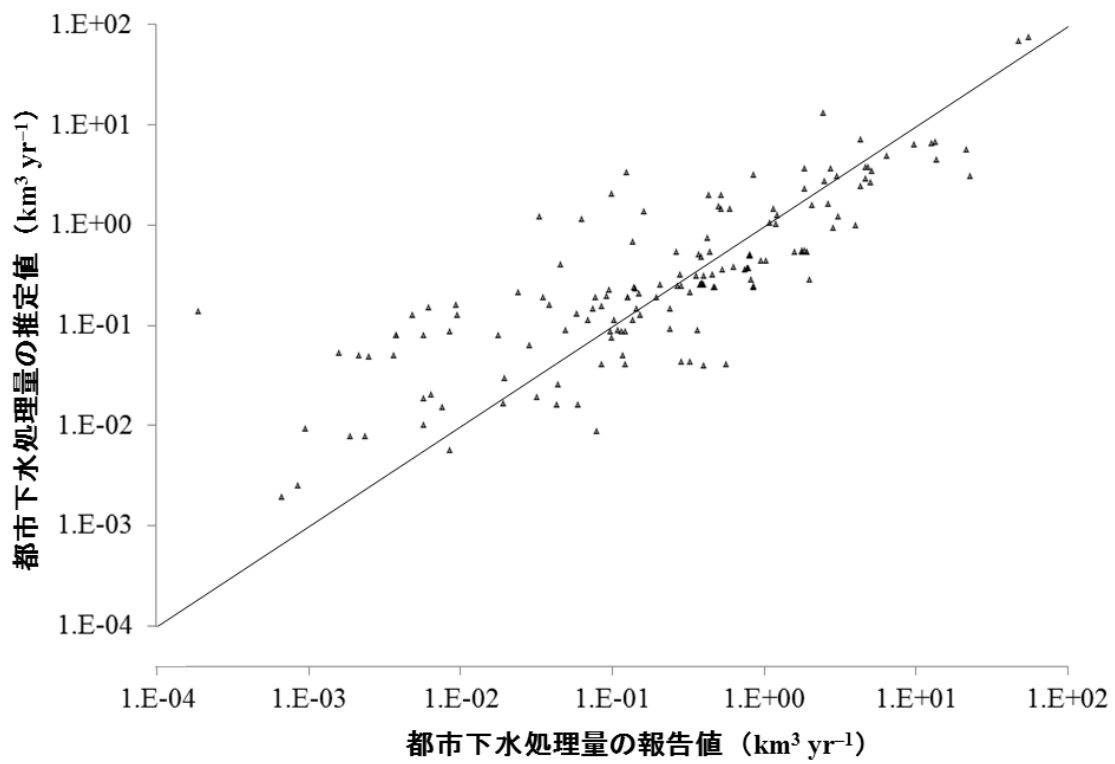


図 10 都市下水処理量の報告値と推定値の比較

(n=152, 直線は 1:1 線, 推定適合度は 0.75)

WWAP (2003) によると、発展途上国の生活廃水の平均 90% および工業廃水の平均 70% が未処理のまま排出されており、しばしば、水源を汚染していると危惧されている。本研究において、いくつかの高所得国において生成量に対する処理量の割合が過小評価されていた。これは主に、ヨーロッパの国において、都市下水の生成量が過大評価されている一方で、処理量の推定値が報告値よりも低いこと、および日本の処理量の報告値が 10~14 km³ であるが、推定値がわずか 4 km³ と過小評価されていることに起因すると考えられた。ヨーロッパ地域並びに日本における過小評価の要因として、高所得国でかつ処理量の多い国のデータ数が少ないこと、および処理量が広範囲で存在することによると考えられた。

北アメリカ地域の都市下水の生成量に対する処理割合が最も高く、1990~2010 年まで平均して 80% 以上が処理されていた。他の地域における生成量に対する処理量の割合は以下の順であった：MENA 地域 (63%) > オセアニア地域 (58%) > 旧ソビエト連邦諸国 (46%) > ヨーロッパ地域 (45%) > ラテンアメリカ地域 (20%) > アジア地域 (19%) > サブサハラアメリカ地域 (15%)。未処理の都市下水の排出は 1990 年から 2010 年にかけて、2 倍に増加した (図 11)。アジア地域は未処理の都市下水の最大の排出源であり、世界の 40% に相当する未処理水を排出している。本推定において、未処理のまま都市下水が水域へ放出されていると推定された地域は UNEP-GPA (2004) の推定地域とおおよそ同じであった。UNEP-GPA (2004) の推定は、生物化学的酸素要求量 (BOD) や窒素、リンの負荷量に基づき行われ、10 海域のうちアジアやアフリカ、ラテンアメリカ、地中海、カスピ海などの 8 海域において、都市下水排出量の 50% 以上が未処理のまま海域に排出されていると見積もっている。さらに、地中海、カスピ海および東アフリカ海域を除く 5 つの海域において 80% 以上が未処理のまま排水されていると推定されている (UNEP-GPA, 2004)。

多くの発展途上国においては、人口の増加に処理施設が不十分なことや処理施設の維持の管理水準が低いことにより、処理された都市下水の水質は低く、先進国のレベルに到達していない (Qadir *et al.*, 2010b; OECD, 2008)。また、先進国内においても処理レベルやその処理法には大きな違いが見られる。OECD (2008) によると高次処理施設に接続されている人口は、アイルランド国やトルコ国において 10% 以下である。一方、オーストリア国、デンマーク国、フィンランド国、ドイツ国、オランダ国およびスウェーデン国においては 80% を超えている。処理された下水の水質は処理レベルやその処理工程、処理場の稼働状況に大きく依存すると考えられている。それゆえ、今後の研究においては、今回の推定と BOD や窒素、リン濃度などの水質データを統合し、検討する必要があると考えら

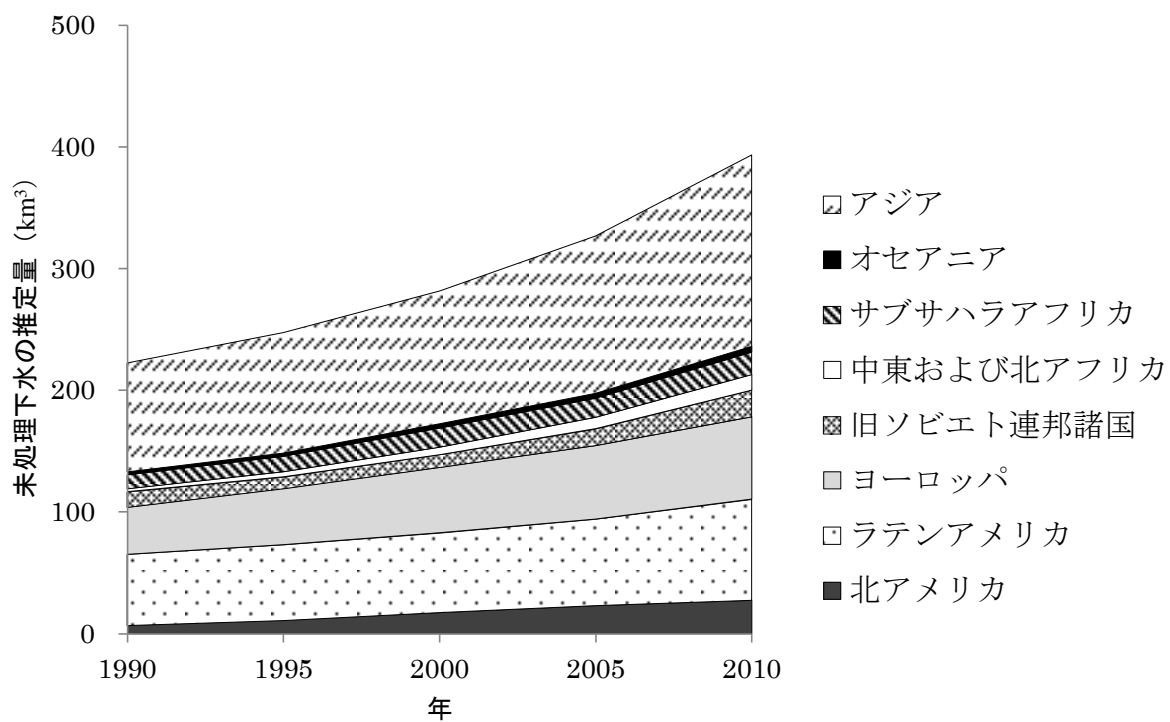


図 11 各地域における未処理都市下水の推定量

れた。BOD の排出量データは WB のデータベース（2013）において参照することができ、世界の河川においては、多くの論文や出版物により水質データの利用が可能である。

3.4. 結論

本研究では、都市下水の生成量の推定因子として、都市人口、経済指標および年間都市降水総量を用いた。都市下水の処理量は都市人口、経済指標、衛生施設の普及率および都市発展指数から推定した。その推定適合度が都市下水の生成量に対して 0.92、処理量に対しては 0.75 であり、これらの数値は都市下水の生成量および処理量の報告がない国と年代におけるそれぞれの推定には十分適用可能と判断された。

世界の都市下水の生成量は、1990 年には 368 km³、1995 年には 421 km³、2000 年には 460 km³、2005 年には 516 km³、2010 年には 579 km³ であると見積もられた。世界の都市下水の生成量は農業用水の取水量の 20%ほどであり、世界の半数の国において農業用水の取水量の 50%以上を賄うことができると試算された。それゆえ、都市下水は新たな水資源としての大きな可能性があると考えられた。

その一方で、都市下水の処理量は推定生成量のわずか 31%であった。特に、低所得国においては生成量の平均 11%、下位中所得国は 13%、上位中所得国は 21%がいずれかの処理を受けていると推定された。この結果から、発展途上国において下水処理施設の建設をさらに加速して進める必要があると示唆された。また、都市下水は窒素やリンなどの肥料成分を灌漑農地に供給することができるため、処理下水の再利用目的や排出先によって、下水処理場の能力を検討することも必要であると考えられた。

今後の研究においては流域ごとや地域ごとのより小さな範囲で行うこと並びに BOD や窒素、リンなどの水質データとの合成によって、環境負荷量の推定が望まれる。今回の推定においては一部の先進国は当てはまりが良くなかった。各国にそれぞれ長年のデータの蓄積がある先進国においては、個別に推定することによって精度を高められる可能性が考えられた。

第4章 シリア国北西部における長期間の都市下水の灌漑利用が環境に及ぼす影響

4.1. 長期間の都市下水灌漑利用が農業環境に及ぼす影響～土壌および灌漑水の塩類集積の危険性、肥料成分の蓄積並びに灌漑水の生物化学的汚染指標～

4.1.1. 緒言および目的

中東および北アフリカ (MENA) 地域は最も水資源がひっ迫している地域であり、都市下水の農業利用が注目かつ実践されている地域である。処理都市下水の灌漑はこの地域に必要な一般的な利用法であるが、膨大な量の未処理または不十分な処理しかされていない都市下水が、非制御に農家へ利用されている。さらに、不適切な利用をしている地域においては都市部の人口の急増および都市部の拡大も同時に生じている場合が多く、今後も都市下水の処理は厳しい状況が進行していくと考えられる。その結果、未処理水や不十分な処理しかされていない都市下水の利用は今後も MENA 地域において増加すると考えられた。都市下水の農業利用に伴う最も高い懸念事項は、公衆衛生の確保並びに農業環境の汚染防止である (Habbari *et al.*, 2000; Qadir *et al.*, 2010b)。このような適切な処理を伴わない都市下水の農業利用は、細菌などによる水系感染症の拡大や長期的には重金属汚染が懸念される (Habbari *et al.*, 2000; Qadir *et al.*, 2010b)。しかし、MENA 地域における未処理もしくは不十分な都市下水の農業利用に伴うこれらの影響評価は十分でなく、さらに、シリアを含むいくつかの MENA 諸国においては、ほとんど存在していない。そのことから、シリアを含むいくつかの MENA 諸国において、都市下水の利用による農業管理が必ずしも適切にはなされていない。したがって、これらの国の都市下水灌漑農業において、適切な農業管理を行うためには、都市下水の長期連用に伴う土壌中の重金属の動態の把握をはじめとした土壌—植物系に与える影響の把握が必要である。

そこで、本章では、今後の MENA 地域において、広く使用されると予測される未処理および不十分な処理下水の安全な農業利用を確立する一助とすることを目的とした。つまり、MENA 地域における未処理および不十分な処理水を灌漑水として用いた場合の環境影響を明らかにし、特に、シリア北西部乾燥地域におけるクウェイック川の水質の時間的および空間的変動並びにこの灌漑水を長期間利用している土壌—植物系に及ぼす影響を把握した。加えて、都市下水灌漑農地における重金属の汚染程度を全含量および可給態並び

に逐次抽出法および選択溶解法を用いて化学形態を明らかにし、長期間の都市下水の利用が土壌重金属の集積に及ぼす影響を明らかにした。

4.1.2. 材料および方法

4.1.2.1. 調査地概要

調査地域はシリア国北西部に位置する第二の都市アレッポ（人口：230 万人）周辺地域を調査した（図 12）。この地域は水資源がひっ迫しており、長年にわたり未処理もしくは不十分な処理下水が混入している地域のため、MENA 地域の多くの都市周辺地域のモデルとなりえると考えられた。都市周辺の都市下水灌漑農地は約 2 万 ha において種々の作物に利用されている（Zulita, 2003）。国際乾燥地農業研究所内の 1998～2008 年の気象データによると、この地域の年平均降水量は約 300 mm である一方、年平均可能蒸発散量は 2,500 mm である。アレッポに最初の下水処理場が完成する 2002 年まで、アレッポとその周辺地域の住民はクウェイック川（Qweik River）へ未処理の都市下水を放出していた。この下水処理場の処理過程は、最初沈殿池、沈砂池および生物反応槽から成る曝気式ラグーン法を用いている。しかし、クウェイック川沿いの集落や工場においては未処理水を直接河川に排出している。近年、乾季（4～8 月）の水質改善のためにユーフラテス河（Euphrates River）からクウェイック川への水路が建設された。そのため、調査期間を通じて、クウェイック川は処理—未処理、家庭—工業、希釈—非希釈の混合水からなる。表 16 は処理場からの 2 km の地点におけるクウェイック川の水量の内訳を示している。この汚染された河川水を農家はポンプを使用し、表面灌漑を行っている（図 13）。そのため、下水処理場よりも下流域においては都市下水が大半を占めているため、本研究においてはこの灌漑水を利用した灌漑を「都市下水灌漑」とみなした。

4.1.2.2. 灌漑水、土壌および植物体の採取法

都市下水が混入した灌漑水の水質の空間的変動を把握するために、流域を上流部、中流部、下流部の 3 つに区分した（図 12）。各区分において定点観測地を定め、6 地点（計 18 地点）から灌漑水を採取した。土壌および植物体は灌漑水を 25 年以上利用している流域の各 3 区分の 6 圃場（計 18 圃場）から採取した。灌漑水試料は 2009～2010 年の 1 月から各月の最終週に深さ 40 cm の流水を採取した（2009 年 9 月のデータは欠損した。）。採取した灌漑水試料は直ちにクーラーボックスに入れ、実験室に輸送し、全ての水試料は分析まで冷暗所（0～10℃）に保管した。小麦（*Triticum aestivum* L.）の登熟後期（2009 年

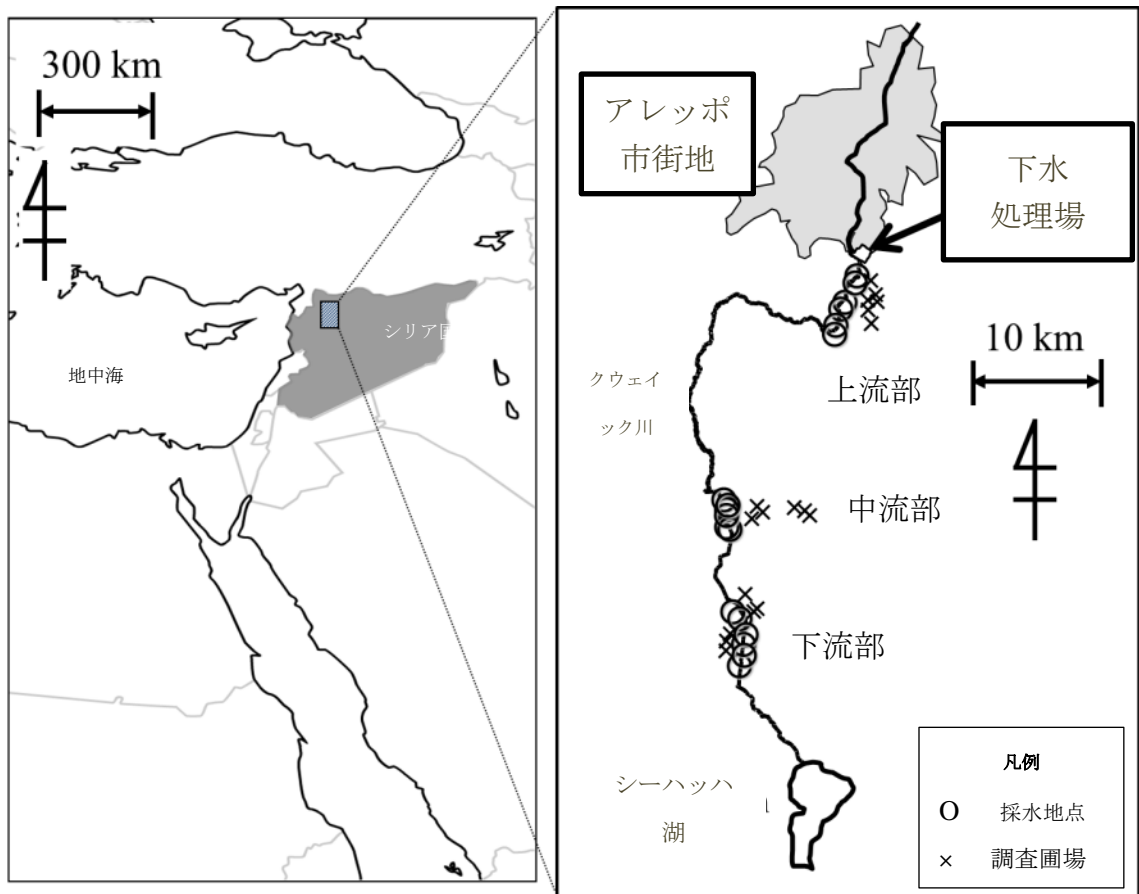


図 12 シリア国アレppo都市近郊地域における調査地域概要



写真 1 灌漑水源であるクウェイック川沿いに並ぶ取水用のポンプの様子.



写真 2 灌漑水を運ぶホースの様子.
ポンプを用い取水した灌漑水は遠い圃場では 10 数 km 運ばれていく.



写真 3 都市下水を灌漑している農家の様子
(Dr Manzoor Qadir 上席研究員による写真提供)

図 13 シリア国アレッポ都市近郊地域における都市下水灌漑の様子

表 16 シリア国, アレッポ地域のクウェイック川の水量 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) の内訳

期間	Q_{Qweik}^a	Q_{WWTP}^b	Q_{Canal}	全水量
1月～4月初旬	0.6	6.6	-	7.2
4月中旬～8月	0.0	6.6	3.0	9.6
9月～12月	0.0	7.7	-	7.7

^a Q_{Qweik} はクウェイック川の都市下水混入前の水量を表している.

^b Q_{WWTP} はアレッポの下水処理場からクウェイック川への放出水量を示している.

^c Q_{Canal} はユーフラテス河からの水質改善のための付加水量を表している

5月)に小麦子実および茎葉を各圃場5点小口採取し、収穫後(2009年6月)同地点において、土壌を採取した。

土壌試料はソイルオーガを用いて異なる深さ(0~10, 10~20, 20~50, 50~80 cm)から採取した。小麦子実および茎葉並びに土壌の小口試料は採取後、同量を混合し、分析用試料とした。

4.1.2.3. 灌漑水, 土壌および植物体分析法

4.1.2.3.1. 灌漑水試料

灌漑水試料のpHおよび電気伝導度(EC)はpH計(Orion Model 720A, Thermo Electron Corporation, Massachusetts)およびEC計(CDM 83, Radio Meter A/S, Copenhagen, Denmark)を使用した。全窒素はKjeldahl法(Ryan *et al.*, 2001), アンモニア態窒素および硝酸態窒素は水蒸気蒸留法(Ryan *et al.*, 2001)により定量した。有機態窒素は、全窒素と無機態(アンモニア態窒素および硝酸態窒素の合計)の差から算出した。全リンは硝酸および塩酸分解後、水溶性リンは水試料を濾過後、モリブデンブルー法(Ryan *et al.*, 2001)により定量した。有機態リンは、全リンと無機態(水溶性リン)の差から算出した。ナトリウムイオンおよびカリウムイオン濃度は炎光光度法(model 410, Sherwood Scientific Ltd, Cambridge, UK), カルシウムイオンおよびマグネシウムイオン濃度はエチレンジアミン4酢酸を用いた滴定法により定量した(Ryan *et al.*, 2001)。ナトリウム吸着比(SAR)は、ナトリウムイオン、カルシウムイオンおよびマグネシウムイオン濃度から算出した。浮遊物質(TSS), 生物化学的酸素要求量(BOD₅), 化学的酸素要求量(COD), 大腸菌群(*E. Coli*)およびふん便系大腸菌群(*F. Coli.*)は米国公衆衛生局(APHA, 2005)の方法に準じ分析した。この流域の1年間の経時変化を把握するため、欠損した2009年9月のデータは2009年8月と10月の平均値から算出、推定した。

4.1.2.3.2. 土壌試料

2-mm以下の風乾細土について、以下の分析を行った。水溶性陽イオン(ナトリウムイオン, カリウムイオン, カルシウムイオン, マグネシウムイオン)およびEC, pHは飽和抽出を行い、灌漑水試料と同様な方法を用いて分析した。粒径組成は比重計法(Ryan *et al.*, 2001), 有機物含量はWalkley-Black法(Nelson and Sommers, 1996), 全窒素はKjeldahl法(Ryan *et al.*, 2001), 可給態リンはOlsen法(Olsen *et al.*, 1954)により分析した。

4.1.2.3.2. 植物体試料

植物体試料は脱イオン水を用いて土壌粒子を除去した後、乾燥させた（70℃、72 時間）。乾燥試料は子実と茎葉に分け、乾物重量を測定した。

4.1.2.4. 統計処理

Tukey の多重比較検定および Pearson の相関係数を含む統計分析は、EXCEL 統計（ver. 6.05a, Esumi Co., Ltd., Tokyo）を用いた。

4.1.3. 結果および考察

4.1.3.1. 灌漑水の流域区分による空間的変動

毎月採取した水試料は、EC、pH および全リンにおいて、中流域においてわずかに高い傾向を示したが、その他の分析項目（SAR、全窒素、アンモニア態窒素、硝酸態窒素、有機態窒素、有機態リン、水溶性リン、BOD₅、COD、*E.Coli.*、*F.Coli.*）において、3 区分（上流、中流、下流）による有意差（ $p>0.05$ ）が確認されなかった。また、EC、pH および全リンにおいてもほとんどの期間、流域の平均値の差は測定値の 10%以内であり、空間的変動は小さいと考えられた。そのため、以下の結果および考察には採取地域 3 区分（上流、中流、下流）を統合し、平均値に基づき行った。

4.1.3.2. 灌漑水の塩類化およびソーダ質化危険性および土壌の塩類化およびソーダ質化の状況

クウェイック川から採取した灌漑水試料の EC および SAR は $1.0\sim 1.5\text{ dS m}^{-1}$ 、 $2\sim 5\text{ (mmolc L}^{-1})^{0.5}$ の範囲であった（図 14）。都市下水の農業利用に関する世界保健機構（以下、WHO）の基準値（WHO, 2006）によると、ユーフラテス河からの導水時期においても灌漑水の EC および SAR による使用制限（slight to moderate restriction of use）はほとんどないと考えられた。シリア国の都市下水の農業利用に関する基準によれば、その基準値内であった（SASMO, 2003）。調査した全ての圃場の表層土において、土壌の ECe および SAR は、平均 1.3 dS m^{-1} および $4.1\text{ (mmolc L}^{-1})^{0.5}$ であり、非塩性—非ソーダ質土壌に分類された。土壌断面内においては ECe および SAR が深さとともに徐々に増加し、50~80 cm において平均 3.1 dS m^{-1} および $8.8\text{ (mmolc L}^{-1})^{0.5}$ にまで増加した。

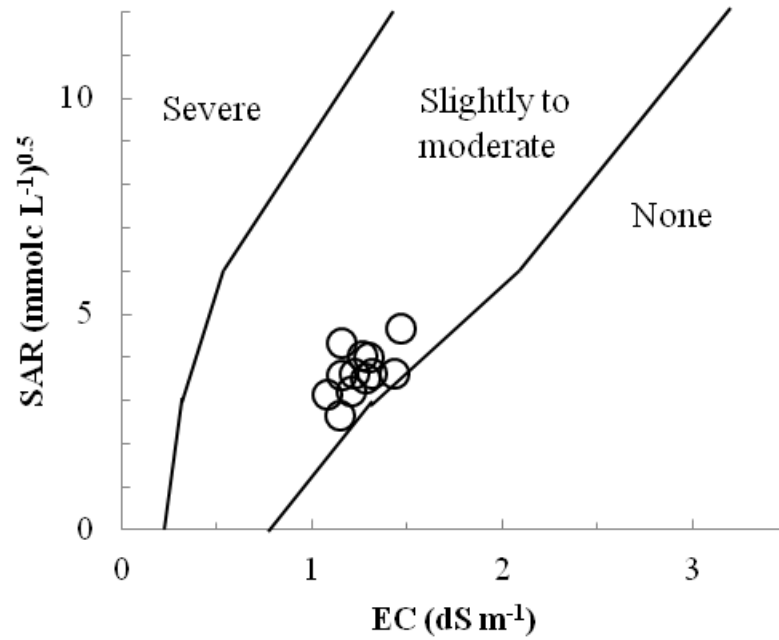


図 14 シリア国，都市下水を主成分とするクウェイック川の EC および SAR.
WHO による都市下水の農業利用に伴う使用制限に関する基準

以上のことから、本調査地域においては、25年以上の都市下水の灌漑利用を行っても、土壌の塩性化およびソーダ質化は進行していなかった。しかし、都市下水の EC および SAR は生活廃水および工業廃水量の相対的な割合に強く依存される (Qadir and Scott, 2010)。したがって、クウェイック川の EC および SAR はアレppo都市部の人間活動や産業発展に伴い変化すると考えられ、その結果、土壌の塩性化およびソーダ質化の危険性も変化すると考えられた。土壌の塩性化およびソーダ質化の危険性を減少させるためには定期的な調査によって水質の変化を把握する必要があると考えられた。特に、下流域においては上流域よりも相対的に粘質な土性であり (付表 3)、灌漑水の塩性化の変化が土壌に与える危険性が相対的に高いと考えられた。

4.1.3.2. 灌漑水中の栄養塩濃度と土壌の栄養塩含量

クウェイック川の全窒素濃度は $21\sim 35\text{ mg L}^{-1}$ の範囲にあり、その 60%以上がアンモニア態窒素であった (図 15)。全リンおよびカリウムイオン濃度は $5.9\sim 8.6\text{ mg-P L}^{-1}$ (図 16) および $7.3\sim 23\text{ mg-K L}^{-1}$ であった。灌漑水の全窒素濃度の範囲は、未処理下水によって重度に汚染されているインド国ハリヤナ地域 (Gupta *et al.*, 1998) やメキシコ国グアナファト川流域 (Scott *et al.*, 2000) の報告値よりも低い値であった。しかし、WHO (2006) 基準と照らし合わせると、大半の水試料は厳しい利用制限 (Severe restrict of use) に区分された。また、Segal-Rozenhaimer *et al.* (2004) によると下水処理が不十分な都市下水の混入によりアンモニア態窒素の構成割合が高まると報告されている。本調査地域においてもアレppoの下水処理場が十分に機能していないことにより全窒素に対するアンモニア態窒素の割合が高くなったと考えられた。MENA 地域の下水処理場の多くは、生活および工業廃水の混合水に対する処理能力を持たず、人口の急増により過負荷状態にあるといわれている (Qadir *et al.*, 2010b)。その結果、処理場における十分な処理反応時間を確保することができず、低水質な処理水を環境中に放出しており、アレppo地域においても同様な現象が生じていたと考えられた。処理が不十分であったことを裏付けるように、灌漑水中の平均 TSS 濃度 (271 mg L^{-1}) も高かった。採取した水試料の約 70%において、WHO の許容限度 ($\text{TSS} < 100\text{ mg L}^{-1}$; WHO, 2006) を上回り、60%の試料がシリア国の基準 ($\text{TSS} < 150\text{ mg L}^{-1}$; SASMO, 2003) を超過していた。クウェイック川を灌漑利用する場合、施肥量の削減を考慮する必要があるほどに大量の養分が供給されると見積もられた (表 17)。

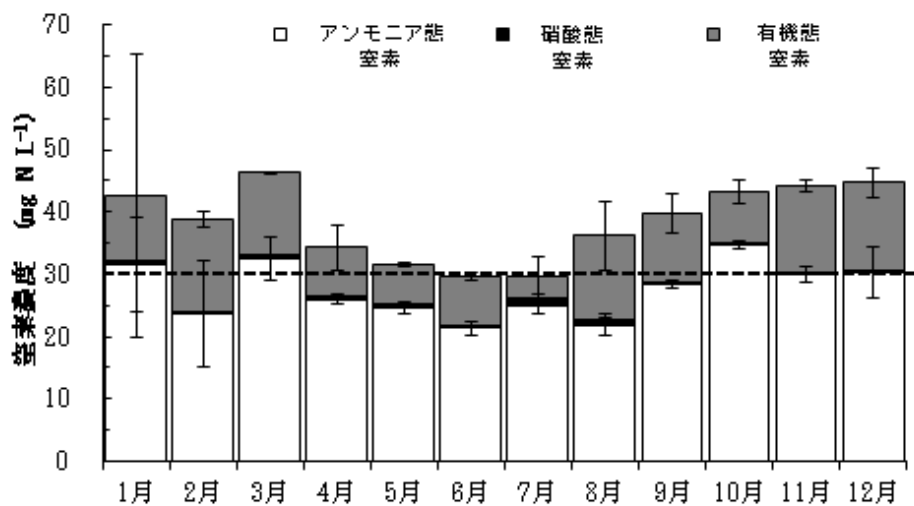


図 15 シリア国，都市下水を主成分とするクウェイック川の窒素組成の経時変化

破線は WHO (2006) の都市下水の農業利用に関する許容値．図中のバーは標準誤差を示す．

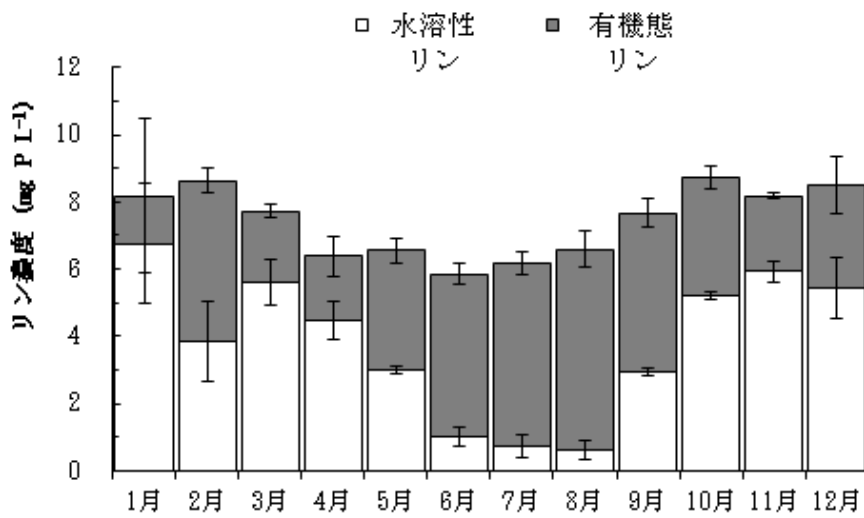


図 16 シリア国, 都市下水を主成分とするクウェイック川のリン組成の経時変化
 図中のバーは標準誤差を示す.

表 17 シリア国, クウェイック川の養分負荷量 (窒素, リン, カリウム) の推定

養分	濃度 (mg L ⁻¹)	養分負荷量 (kg ha ⁻¹)	
		3000 m ³ ha ⁻¹ の場合	5000 m ³ ha ⁻¹ の場合
窒素	22~54	66~162	110~270
リン	5~12	15~ 36	25~ 60
カリウム	12~37	36~111	60~185

Oweis *et al.* (1999) によると、本調査地域における小麦の必要灌水量は $3,000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ であり、この $3,000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ 中には窒素として $63\sim 105 \text{ kg-N ha}^{-1}$ およびリンとして $18\sim 27 \text{ kg-P ha}^{-1}$ 供給できる養分が含まれている。本調査地域の一般的な灌漑管理 ($5000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) を行くと、シリア農務省による小麦慣行施肥量 (FAO, 2003b) に対して窒素は全量を、リンは半分程度を賄うことが可能であると見積もられた。これらの養分供給量はパキスタン国、パンジャブ州の未処理都市下水灌漑農地の報告に匹敵していた (Matsuno *et al.*, 2005)。

表層土 (0~10 cm) の土壌有機物含量、可給態リンおよび全窒素含量は、それぞれ、 $11\sim 50 \text{ mg kg}^{-1}$ (平均値 20 mg kg^{-1})、 $8.2\sim 120 \text{ mg-P kg}^{-1}$ (平均値 29 mg-P kg^{-1})、 $0.7\sim 3.1 \text{ g-N kg}^{-1}$ (平均値 1.3 g-N kg^{-1}) であった。大半の圃場においては Rashid (1997) による乾燥地土壌における肥沃度の分類において十分量 (adequate) に区分された。また、本調査地域の地下水灌漑農地の既報値 (Ryan *et al.*, 1996) よりも高かった。さらに、これらの土壌断面内における含量は相互に強い相関 ($r > 0.9$, $p < 0.01$) を持っており、都市下水の灌漑によって、有機物、リンおよび窒素が土壌に蓄積したと考えられた。都市下水灌漑によって土壌中の肥料成分含量は増加する (Siebe, 1998; Rattan *et al.*, 2005; Rusan *et al.*, 2007) 一方、過剰な窒素による収穫物の質の低下や成熟期の遅れ、雑草の成育向上などの不利益が報告されている (Asano and Pettygrove, 1987; Qadir and Scott, 2010)。

4.1.3.3. 植物体収量

小麦の子実および茎葉の収量はそれぞれ $6.6\sim 10.2 \text{ t ha}^{-1}$ (平均 8.1 t ha^{-1}) および $4.7\sim 11.2 \text{ t ha}^{-1}$ (平均 7.7 t ha^{-1}) であった。シリア国の平均子実収量 $3\sim 3.8 \text{ t ha}^{-1}$ である (FAO, 2003b)。シリア国においては、土壌の塩類集積や低い可給態リン含量、栽培期間を通じて灌漑水の確保が収量の主な制限要因であると報告されている (Ryan *et al.*, 1996; FAO, 2003b)。本研究地においては、土壌の塩類集積 { (土壌の ECe の平均 1.3 dS m^{-1} , 同 $\text{SAR}4.1 (\text{mmolc L}^{-1})^{0.5}$ } が進行しておらずかつ土壌中の可給態リン含量も十分量存在し、都市下水が通年利用できるため、子実収量がシリア国平均よりも約 2 倍以上高かったと考えられた。その一方、土壌中の全窒素および可給態リン含量は集積傾向にあり、加えて、本調査地域の農家は小麦栽培中に多量の肥料 { 窒素肥料 $0\sim 219 \text{ kg ha}^{-1}$ (平均 86 kg ha^{-1})、リン酸肥料 (P_2O_5) $0\sim 500 \text{ kg ha}^{-1}$ (平均 140 kg ha^{-1}) } を施用していた。土壌中に窒素やリンが集積傾向にあることから、多くの化学肥料が都市下水由来の窒素およびリンと競合している可能性があり、収量の増加に与える化学肥料の施用の費用対効果を低下させ

ると考えられた。そのため、灌漑水からの供給を考慮した化学肥料の適切な施肥量の策定は、収量の減少をもたらすことなく経済的な利益を高められる可能性が示唆された。

4.1.3.4. 灌漑水中の化学的酸素要求量および生物化学的酸素要求量並びに細菌量

2010年におけるクウェイック川の平均CODおよびBOD₅はそれぞれ353, 182 mg L⁻¹であった(図17)。さらに、大腸菌群(*F. Cloli*, *E. Coli.*)は $16 \times 10^6 \sim 109 \times 10^6$ MPN L⁻¹および $2 \times 10^6 \sim 57 \times 10^6$ MPN L⁻¹であった。これらはシリア国における都市下水の農業利用の基準値(SASMO, 2003; 1×10^6 MPN L⁻¹)を大きく超過していた。これら病原菌の高い汚染の危険性や高い酸素要求量はアレppoの下水処理場が十分機能していないことに起因すると考えられた。特に、大腸菌群が多く含まれていたことは、塩素滅菌処理が十分行われておらず、さらに高いBOD₅やCOD濃度は有機物分解処理が十分行われていないと考えられた。このような状況はMENA地域の多くの下水処理場において、確認されている(Qadir et al., 2010b)。MENA地域の下水処理場の多くは、生活および工業廃水の混合水に対する処理能力を持たず、人口の急増により過負荷状態にあるといわれている(Qadir et al., 2010b)。

シリア国においては、1990~1995年および1995~2000年の間に腸チフスおよび肝炎感染者数は10倍に増加し、下痢性の疾患症例は2倍増加していた。Kaisi et al. (2005)によると、ダマスカスおよびアレppoの都市近郊地域の人口の約75%が水系疾患に暴露しその結果、赤痢の感染が大規模に生じていたと報告している。2003年には、5歳以下の幼児の腸チフス6000例および下痢性の疾患3.5万例を含め、水系疾患の症例数は100万例に到達していた(Kaisi et al., 2005)。この細菌の流行は十分な下水処理が行われていない都市下水を灌漑に使用しているために広がっていると考えられている(Kaisi et al., 2005)。今回の調査からもシリア国第2の都市のアレppoから排出される都市下水は、処理場の滅菌処理が不十分なため、都市下水が混入するクウェイック川において、シリア国基準(SASMO, 2003)と比較しても高い細菌濃度であった。この結果は、Kaisi et al. (2005)による十分な下水処理が行われていない灌漑水の利用が公衆衛生の悪化を招くという見解を裏付けている。そのため、農家や消費者の衛生教育の拡充をより強力に進める必要が考えられた。さらに、下水処理場の処理能力が著しく低いことから、下水処理場の消毒過程の能力を重点的に向上させることも有効であると考えられた。

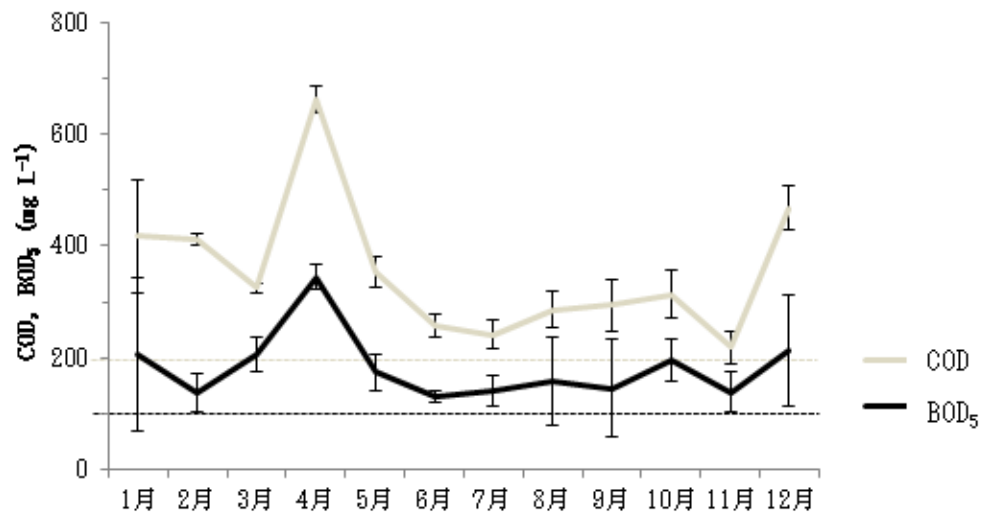


図 17 クウェイック川における COD および BOD₅ の経時変化

両破線はシリア国の都市下水の灌漑利用への基準値 (No. 2752; SASMO 2003) を示す。図中のバーは標準誤差を示す。

4.1.4. 結論

クウェイック川は、未処理および不十分な処理を受けた生活廃水と工業廃水が混入し、乾季にはユーフラテス河からの導水により、これらの都市下水は希釈されている。このクウェイック川の生活環境項目 {pH, 浮遊物質, 全窒素, 全リン, 生物化学的酸素要求量 (BOD₅), 化学的酸素要求量 (COD), 大腸菌群} に関する水質は、流域によって小さな空間変動を示していた。灌漑水であるクウェイック川の水質は (1) 軽微から中程度の塩性化およびソーダ質化, (2) 高い養分蓄積および (3) 高い病原菌の汚染 (高 BOD₅, COD, 大腸菌群) の危険性があった。クウェイック川を灌漑水として利用する場合、都市下水灌漑は病原菌の感染および窒素やリンなどの植物の養分の不均衡を引き起こす高い危険性が示唆された。都市下水灌漑による高い養分供給能は土壌の窒素などの無機養分の不均衡を引き起こし、さらに、栽培作物の品質の低下や雑草の繁茂を導く可能性が考えられた。MENA 地域において、部分的なもしくは不十分な処理都市下水は農業に対して潜在的な可能性を持ち、現実的に広く利用されている。それゆえ、下水処理を再利用の目的に応じた処理を行うことだけでなく、適切な量の肥培管理等の農業管理によって、都市下水の農業利用への効率や安全性を確保することが望ましいと考えられた。

4.2. 長期間の都市下水灌漑利用に伴う土壌重金属汚染

4.2.1. 緒言および目的

都市粉塵や車製品の破片を含む都市流去水や工場廃水は都市下水を構成するものであり、これらに高濃度で含まれる重金属は (Li *et al.*, 2001; Al-Masri *et al.*, 2006), 長期間の都市下水の灌漑利用により土壌へ蓄積され、最終的に作物への汚染につながると懸念されている (Lucho-Constantino *et al.*, 2005; WHO, 2006; Qishlaqi *et al.*, 2008; Bashir *et al.*, 2009; Rezapour and Samadi, 2011)。土壌中の重金属含量は土壌の重金属汚染の空間分布を把握するためには有用である一方、生物への可給性や環境中における挙動は必ずしも全含量と一致しない (Han, 2007; Achiba *et al.*, 2009; Bashir *et al.*, 2009)。それゆえ、重金属の環境中の実際の動態を評価する場合、土壌中の化学的形態や組成の把握は重要である (Tessier *et al.*, 1979)。Tessier *et al.* (1979) による逐次抽出法は土壌中の重金属の化学的形態を把握するために広く使用されており、土壌中の全重金属を抽出特性により操作定義された 5 つの“形態” {交換態 (以下, Exch), 炭酸カルシウム結合態 (以下, Carb), Mn および Fe 酸化物結合態 (以下, Mno/Feo), 有機物結合態 (以下, OM), 残渣 (以下, Res)} に分画する。Exch および Carb 画分は他の画分よりも相対的に高い生物可給性お

よび土壌中の移動性に関連していると考えられている (Narwal and Singh, 1998; Salbu *et al.*, 1998) . Sánchez-Martín *et al.* (2007) による下水汚泥施用土壌における重金属画分の経時的な変化を調べた研究では、培養期間、土壌種および下水汚泥の施用量が土壌重金属の化学的形態に有意に影響していることが示された。また、重金属を人工的に添加した土壌の培養試験によって施用後の時間経過に伴い重金属がより安定的な画分に移行すると報告している (Han and Banin, 1997; Jalali and Khanlari, 2008) . 土壌中のマンガン (以下, Mn) および鉄 (以下, Fe) 酸化物は重金属を多量に吸着することが可能であり、環境中の重金属の挙動を制御できると考えられている (Bradl, 2004; Vodyanitskii, 2010) . 中国の石灰質土壌は実験に使用した酸性および中性土壌よりも Fe 酸化物による亜鉛 (以下, Zn) 吸着容量が高いと報告されている (Han *et al.*, 1995) . これらの知見は土壌中の Mn および Fe 酸化物は都市下水灌漑により混入する重金属の土壌中の挙動に大きな影響を与えている可能性を示唆している。しかし、MENA 地域においては長期間の都市下水灌漑による土壌—植物体への重金属の影響が十分解明されていない。さらに、長期間の都市下水灌漑が土壌重金属の化学的形態に与える影響は十分検討されていない。そのことから、シリアを含むいくつかの MENA 諸国において、都市下水の利用による土壌重金属の生物への可給性や環境中における挙動の変化を適切に評価されていない。したがって、これらの国の都市下水灌漑農業において、重金属の土壌—植物系への蓄積が生じているのか、生じている場合はこれらの重金属の集積を低減させる技術および農業管理の選択が必要である。そのためには、都市下水の長期連用に伴う土壌中の重金属の動態の把握をはじめとした土壌—植物系に与える影響の把握が必要である。

そこで本章では、長期間の都市下水灌漑が土壌中の重金属の挙動、特に化学的形態に及ぼす影響を明らかにした。特に、長期間の都市下水の灌漑利用は土壌中の重金属 {カドミウム (以下, Cd) , クロム (以下, Cr) , 銅 (以下, Cu) , ニッケル (以下, Ni) , 鉛 (以下, Pb) および Zn} の移動性や抽出能、生物への可給性、環境中の動態に及ぼす化学的形態を明らかにした。加えて、土壌 Mn および Fe 酸化物の寄与をそれぞれ明らかにするために選択溶解法にて化学的形態を明らかにした。

4.2.2. 材料および方法

4.2.2.1. 調査地域概要

調査地域は第 4 章と同じ地域および土壌のバックグラウンド値の把握として都市下水灌漑地帯の周辺に広がる地下水灌漑農地を調査した (図 18) . 地下水灌漑農地は 30 m 以深

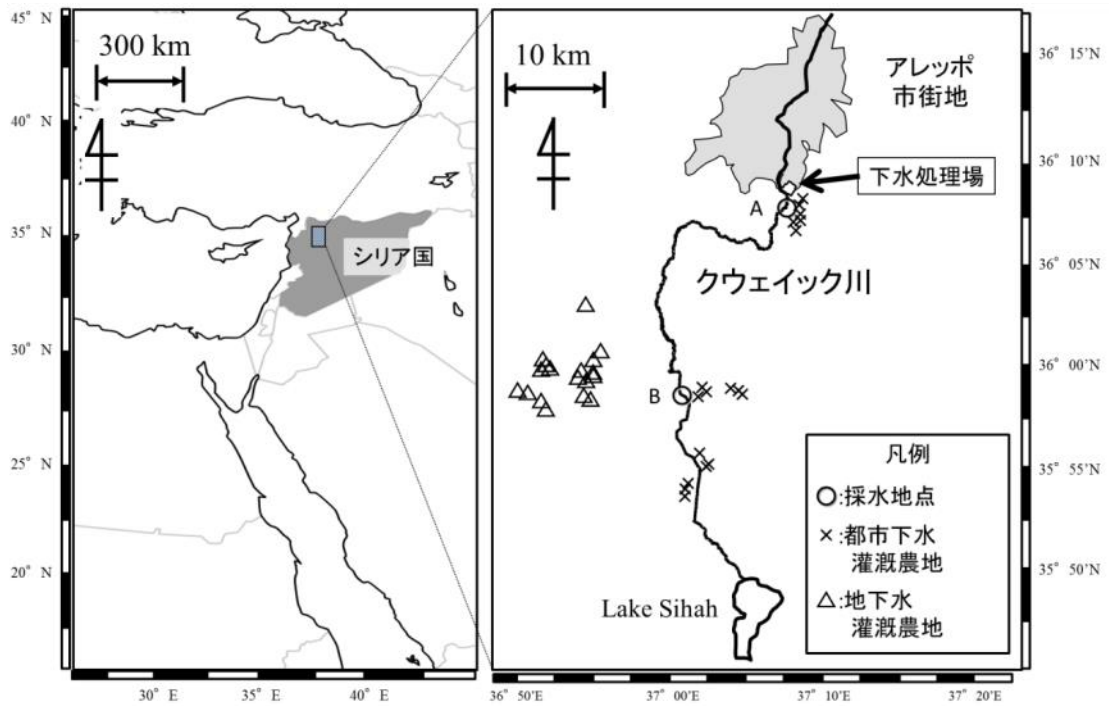


図 18 調査地域概要

A と B は採水地点を示し、それぞれ、下水処理場の下流 0.6 および 27 km に位置していた。

の地下水を灌漑に用いていることから、都市下水の影響をほとんど受けていないとみなした。

4.2.2.2. 灌漑水， 土壌および植物体の採取法

第 4 章より灌漑水の水質の空間的変動が小さいことから、重金属測定用の水試料は灌漑圃場に近い 2 地点において、2009 年 11 月にクウェイック川の深さ 40 cm の流水を採取した。採取地点 A と B は下水処理場の下流 0.6 および 27 km に位置していた（図 18）。都市下水灌漑農地 18 圃場と地下水灌漑農地 18 圃場より、各圃場の 5 地点から表層土壌（0～10 cm）を小口試料として採取した。採取した小口試料は実験室にて同量を混合し、各圃場の混合試料とした。また、小麦（*Triticum aestivum* L.）の登熟後期（2009 年 5 月）に小麦子実および茎葉を都市下水灌漑農地のみから採取を行った。

4.2.2.3. 灌漑水分析法

灌漑水試料の pH および電気伝導度（EC）は pH 計（Orion Model 720A, Thermo Electron Corporation, Massachusetts）および EC 計（CDM 83, Radio Meter A/S, Copenhagen, Denmark）を使用した。TSS は APHA（2005）の準じた方法により測定した。Whatman no. 42 ろ紙（GE Healthcare UK Ltd, Buckinghamshire, UK）を用いてろ過したろ液および未ろ過試料を硝酸および塩酸分解後、ICP-OES（Ciros CCD, Spectro, Kleve, Germany）により重金属濃度（Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn）を測定した（APHA, 2005）。

4.2.2.4. 土壌分析法

2-mm 以下の風乾細土について、以下の分析を行った。EC, pH は飽和抽出を行い、灌漑水試料と同様な方法を用いて分析した。粒径組成は比重計法（Ryan *et al.*, 2001），陽イオン交換容量はバッチ法（Ryan *et al.*, 2001），土壌有機物含量は Walkley-Black 法（Nelson and Sommers, 1996），炭酸カルシウム当量は塩酸中和滴定法（US Salinity Lab., 1954）により分析した。全 Mn, Fe 含量は塩酸および硝酸を用いて分解した後、ICP-OES により測定した（Amacher, 1994）。

可給態重金属含量はジエチレントリアミン 5 酢酸（DTPA），トリエタノールアミン（TEA）および塩化カルシウム抽出法（Lindsay and Norvell, 1978），全重金属含量は硝酸および塩酸分解法により分析した（Amacher, 1994）。土壌重金属の化学的形態は Tessier *et al.*の方法（1979）から残渣画分（Res）を全含量と同様な分解法にて分画した（表 18）。

土壌中の異なる Mn および Fe 酸化物画分を抽出するために、交換性塩基および炭酸塩を除去した後 (Amacher, 1994) , 選択溶解法を使用した (表 19) . 抽出液中の重金属濃度は ICP-OES によって定量した. 供試土壌の一般理化学性は表 20 に示した.

4.2.2.5. 植物体分析法

植物体試料は脱イオン水を用いて土壌粒子を除去した後, 乾燥 (70°C, 72 時間) し, 子実と茎葉に分けた. 乾燥した試料は粉碎した後, 硝酸および過塩素酸分解し (Ryan *et al.*, 2001) , ICP-OES にて全重金属含量を測定した.

4.2.2.6. 土壌の汚染指数

Tomlinson *et al.* (1980) によって考案された汚染指数 (CF) を用いて, 土壌重金属含量および各画分における重金属含量を用いて, 汚染の寄与度を明らかにした. この指標は以下の式を用いて計算した.

$$CF = (C_{hm} \text{ in wastewater irrigated soil}) / (C_{hm} \text{ in background}) \quad \text{式 (10)}$$

式 (10) において, C_{hm} は各重金属の土壌または各画分の重金属含量を表している. 本研究においては, 都市下水灌漑農地の平均値をバックグラウンド濃度として使用した. CF の値は以下のように分類され, $CF < 1$ は低汚染 (low contamination) , $1 \leq CF < 3$ は中程度汚染 (moderate contamination) , $3 \leq CF < 6$ は高汚染 (high contamination) , $CF \geq 6$ は非常に高汚染 (very high contamination) を表している.

4.2.2.7. 統計分析

t-検定および Tukey の多重比較検定, Pearson の相関係数を含む統計分析は, EXCEL 統計 (ver. 6.05a, Esumi Co., Ltd., Tokyo) を用いた.

4.2.2.8. シリア国および国際基準による灌漑水, 土壌および植物体中の重金属の評価

灌漑水の水質はシリア国および国際指標である WHO の「都市下水の灌漑利用に関する水質基準」を用いて評価した (SASMO, 2002 ; WHO, 2006) . 土壌はシリア国における都

表 18 土壤重金属の逐次抽出法およびその化学的形態

{Tessier *et al.* (1979) の方法から, Res 画分は HNO₃-HCl 分解法を用いた}

化学的形態	略語	抽出液	pH	土液比	振とう時間	温度条件
交換態	Exch	1M MgCl ₂	7.0	1:8	1 h	室温
炭酸カルシウム	Carb	1M NaOAc-HOAc	5.0	1:8	5 h	室温
結合態						
Mn および Fe 酸化物	Mno/Feo	0.04M NH ₂ OH·HCl in 25% HOAc (v/v)	2.0	1:25	5 h	95 ± 3 °C
結合態						
有機物結合態	OM	0.02M HNO ₃ , 30% H ₂ O ₂ (v/v)	2.0	1:25	2 h	85 ± 3 °C
		NH ₄ OAc in 20% HNO ₃ (v/v)	無調整		0.5 h	室温
残渣	Res	HNO ₃ -HCl				170 °C

表 19 土壤 Mn および Fe 酸化物の選択溶解法およびその化学的形態

化学的形態/画分	略語	抽出液	pH	土液比	振とう 時間	温度条件	引用文献
易還元性 酸化物画分	RRO	0.04M NH ₂ OH.HCl in 25% HOAc (v/v)	2.0	1:25	0.5 h	室温	Han, 2007
非晶質性 Fe 画分	Amor-Fe	0.04M NH ₂ OH.HCl in 25% HOAc (v/v)	2.0	1:25	5 h	95 ± 3 °C	Tessier <i>et al.</i> , 1979
結晶質性 Fe 画分	Cry-Fe	0.2M (NH ₄) ₂ C ₂ O ₄ - H ₂ C ₂ O ₄ - ascorbic acid	無調整	1:30	0.5 h	温浴 (沸騰 水)	Shuman, 1985;

表 20 都市下水灌漑農地 (WWF) および地下水灌漑農地 (GWF) の表層土 (0~10 cm) の一般理化学性

	ECe	pHe	SAR	CEC	有機物含量	粘土含量	シルト含量	砂含量	炭酸カルシウム当量	全 Fe 含量	全 Mn 含量
	dS m ⁻¹		(mmolc L ⁻¹) ^{0.5}	cmolc kg ⁻¹			g kg ⁻¹				mg kg ⁻¹
WWF	1.3 ± 0.5	8.1 ± 0.2	4.1 ± 1.7	43 ± 6	20 ± 1	612 ± 105	247 ± 25	141 ± 91	213 ± 23	34 ± 5	613 ± 68
GWF	1.1 ± 0.4	7.8 ± 0.1	1.7 ± 0.7	54 ± 5	16 ± 4	682 ± 31	231 ± 31	87 ± 35	207 ± 26	37 ± 4	638 ± 55

表中の値は平均値±標準誤差 (n = 18) を表す.

市下水灌漑農地における基準が利用できなかったため、WHO (2006) における都市下水灌漑農地の基準を評価に使用した。WHO の基準には Cr, Cu, および Zn の基準を定めていないため、欧州委員会 (European Commission, 2008) の提案されている改訂版の下水汚泥の農業利用に関する基準を評価に使用した。土壌と同様に植物体においてもシリア国内基準が利用できなかったため、植物体の子実は国際的な基準であるコーデックス基準 (FAO and WHO, 1984) を用いた。調査地域においては小麦の茎葉は飼料として利用されているため、欧州委員会 (European Commission, 2002) の基準を評価に用いた。

4.2.3. 結果および考察

4.2.3.1. 灌漑水中の重金属汚染

灌漑水の EC および pH は 1.3 dS m^{-1} と $7.3\sim 7.4$ であった。Cu および Zn 濃度が B 地点において高い値を示したが、両地点とも同様な傾向であった。全 Cr 濃度が最も高く、WHO 基準 (2006) よりも 3 倍超過していた。次いで $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{Pb} \approx \text{Ni} > \text{Cd}$ の順であった (表 21)。灌漑水中の Cr および Cu, Zn 濃度は非水溶性画分が主体であったが、水溶性 Cr は WHO (2006) の基準値以下であった。クウェイック川の高い Cr 濃度はアレppoにおける主要産業の一つである皮なめしや毛織産業からの流入が原因であるといわれている (Muruganathan *et al.*, 2004; Song *et al.*, 2004)。他の重金属の汚染源は工場からの廃水や都市粉塵を含む都市流去水が考えられた (Li *et al.*, 2001; Al-Masri *et al.*, 2006)。特に、Pb は有鉛ガソリンから、Cu および Zn, Cd は自動車製品やタイヤ、潤滑油、工場からの廃水が原因であるといわれている (Othman *et al.*, 1997; Wilcke *et al.*, 1998; Möller *et al.*, 2005)。

自動車の排気ガスや都市粉塵、浸食により流亡した土壌粒子の増加が河川の浮遊物質中の重金属含量の増加をもたらしていたことが明らかになっている (Singh *et al.*, 2005; Kucuksezgin *et al.*, 2008; Song *et al.*, 2010)。また、灌漑水試料中には SASMO (150 mg L^{-1}) や WHO (100 mg L^{-1}) の基準を超える TSS を含んでいた。この高い TSS は第 4 章で明らかのように、アレppoの下水処理が不十分であることおよび周辺地域からの雨水や未処理の廃水の更なる混入が考えられた。Cr の主体が非水溶性画分であることおよび水溶性 Cr が WHO 基準内 (2006) であることから、灌漑水の浮遊物質の除去は農地の重金属汚染を低減させる有効な手段であることが示唆された。

表 21 シリア国, クウェイック川における全重金属濃度および全水溶性濃度

		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
		μg L ⁻¹					
A 地点	全濃度	0.9	328	12	25	20	86
	全水溶性	trace	82	trace	22	19	44
B 地点	全濃度	3	391	101	47	39	286
	全水溶性	0.9	51	trace	30	17	35
SASMO (2002) 基準		10	100	200	200	–	2000
WHO (2006) 基準		10	100	200	200	5000	2000

trace は定量下限値以下を示す.

表 22 都市下水灌漑農地 (WWF) および地下水灌漑農地 (GWF) の表層土 (0~10 cm) における全重金属含量

		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
		mg kg ⁻¹					
WWF		1.86 ± 0.34	112 ± 30	46 ± 13	94 ± 16	72 ± 70	74 ± 25
GWF		1.78 ± 0.39	96 ± 6	41 ± 4	92 ± 7	50 ± 8	63 ± 6
		N.S.	*	N.S.	N.S.	†	*
WHO (2006) 基準		4			107	84	
European Commission (2008) 基準		1.5	100	100	70	100	200

†, *, N.S.: t 検定による有意差が 10% および 5%, 有意差なしをそれぞれ示す.

平均値 ± 標準誤差 (n = 18)

4.2.3.2. 長期間の都市下水灌漑が土壤重金属に与える影響

4.2.3.2.1. 土壤全重金属含量および可給態重金属含量

概して、都市下水灌漑土壤の土壤全重金属含量は Cr 含量が最も高く、次いで Ni > Pb ≈ Zn > Cu >> Cd の順であった（表 22）。都市下水灌漑土壤の全 Cr および Zn 含量は地下水灌漑土壤と比較して有意に高く ($p < 0.05$)、Pb においては有意傾向 ($p < 0.10$) であり、都市下水の長期間の利用によって重金属が蓄積していた。重金属汚染は中程度であり、CF 値は Cr および Zn とともに 1.18 であった。Cr および Zn は灌漑水中に多く含まれていたため（表 21）、土壤の全含量に最も大きな影響を与えたと考えられた。都市下水灌漑農地 18 圃場のうち、WHO 基準（2006）を超えた圃場は Ni において 3 圃場、Pb においては 3 圃場であった。また、欧州委員会（2008）によって提案されている Cr の基準値（100 mg kg⁻¹）を 8 圃場で超過しており、その最大含量は基準値の 2 倍に相当した。

両灌漑農地において DTPA 抽出 Cr 含有量は都市下水灌漑農地の 1 試料を除き、検出下限未満 (<0.01 mg kg⁻¹) であった（表 23）。都市下水灌漑農地における DTPA 抽出 Cd, Cu, Ni および Zn は地下水灌漑農地より有意に高かった。しかしながら、DTPA 抽出重金属は全量に対してはるかに小さな割合であり、最も高い割合であった Cu においても全量の平均 5% であった。本研究における DTPA 抽出重金属含量は土壤有機物および全含量と有意な正の相関であり、pH とは負の相関を示した（図 19）。DTPA 抽出 Cd および Cu, Zn は 3 要因と、DTPA 抽出 Ni は pH および有機物含量と、Pb は有機物含量とのみ有意な相関関係を示した ($r > 0.5, p < 0.05$)。

今回の結果は、これまで報告されているように、乾燥地および半乾燥地における都市下水灌漑による土壤重金属の全含量および DTPA 抽出態の増加と同様であった（Lucho-Constantino *et al.*, 2005; Rattan *et al.*, 2005; Qishlaqi *et al.*, 2008; Bashir *et al.*, 2009; Rezapour and Samadi, 2011）。そのため、一般に pH の高い乾燥地土壤であっても、重金属の混入した都市下水を灌漑利用すると土壤中の全量および可給態含量を高めるため、適切な下水処理が必要であるとと考えられた。

表 23 都市下水灌漑農地および地下水灌漑農地の表層土（0～10 cm）における
可給態重金属含量

	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
	mg kg ⁻¹					
都市下 水灌漑	0.03 ± 0.02 ^a	検出されず ^b	3.1 ± 2.4	1.0 ± 0.4	5.1 ± 13.2	3.1 ± 3.6
地下水 灌漑	1.78 ± 0.39	検出されず	1.6 ± 0.2	0.6 ± 0.4	0.2 ± 0.1	0.4 ± 0.1
	**.	N.S.	*.	**	N.S.	**

*, **,N.S.: t 検定による有意差が 5%および 1%, 有意差なしをそれぞれ示す.

^a 平均値±標準誤差 (n = 18)

^b 1 地点のみ 0.62mg kg⁻¹であった.

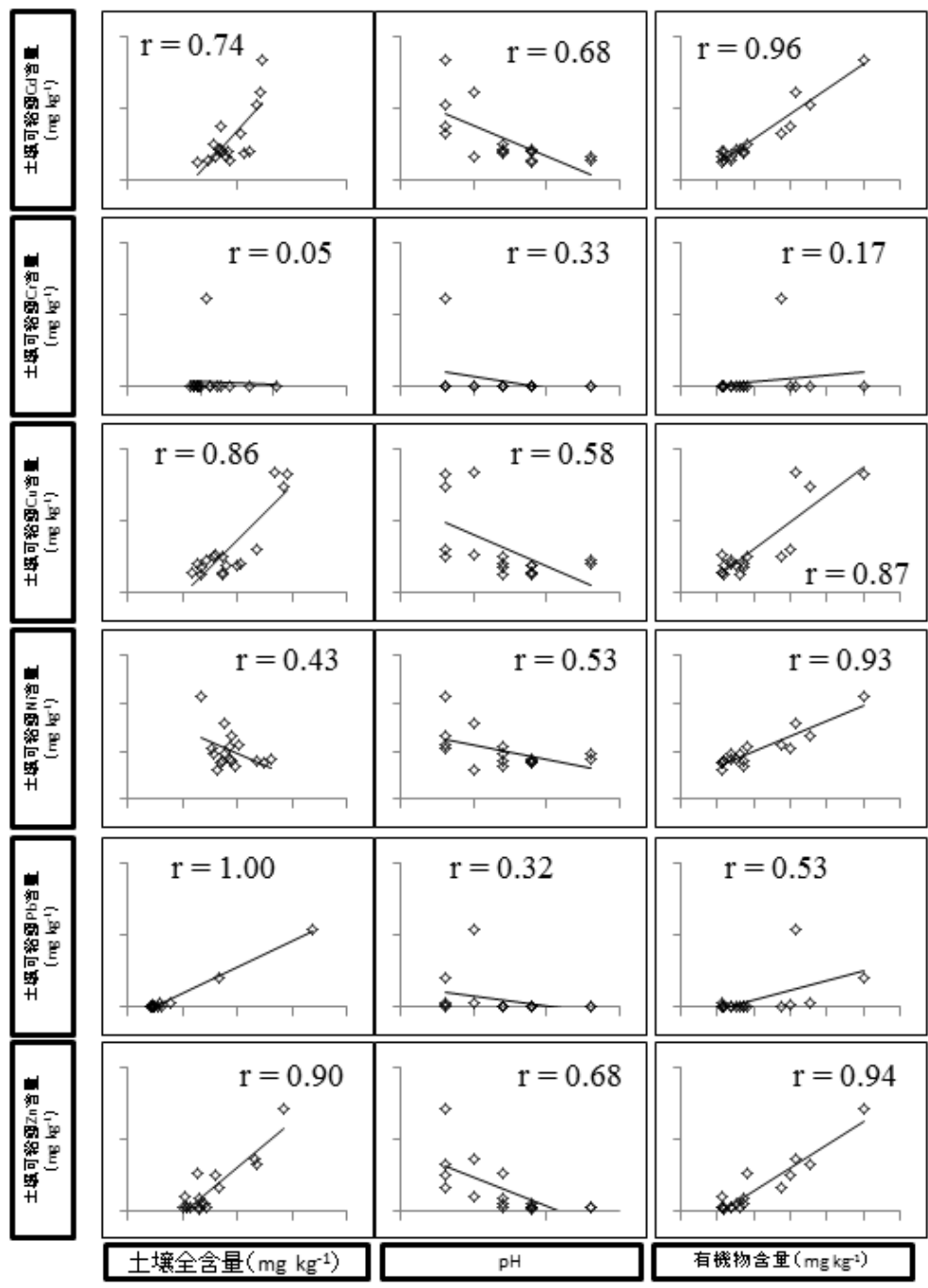


図 19 DTPA 抽出重金属含量と全重金属含量, pH, 有機物含量との相関図

4.2.3.2.2. 土壌重金属の化学的形態

都市下水と地下水灌漑農地の表層土壌（0～10 cm）における主要な化学形態は，Cr，Cu，Zn において Res（残渣）画分であり，Cd においては Carb（炭酸カルシウム結合態）画分，Ni は OM（有機物結合態）および Res 画分，Pb は Mno/Feo（Mn および Fe 酸化物結合態）画分であった．都市下水および地下水灌漑農地における全ての測定した重金属の Res 画分において同程度の含量を示した．加えて，都市下水灌漑農地における Cd，Cr，Cu と Zn の Res 画分においては，全含量との間に有意な相関関係が認められなかった（ $r < 0.5$, $p > 0.05$ ）．つまり，都市下水灌漑農地の全重金属含量および DTPA 抽出重金属含量が増加していたことより，長期間の都市下水灌漑は非残渣画分に影響を与えていたと考えられた（表 24）．Han（2007）によると，重金属の化学的形態は pH や炭酸カルシウム当量，有機物含量，粘土鉱物，Mn および Fe 酸化物および水酸化物の種類と含量などの土壌の理化学性を反映すると考えられている．本研究において，Cd が Carb 画分を主体的に占めていたのは Lucho-Constantino *et al.*（2005）および Bashir *et al.*（2009）の調査地域よりも炭酸カルシウムが豊富に含まれていることに起因すると考えられた．それは，カルシウムおよび Cd はイオン半径が同程度であることから，炭酸カルシウムは高い Cd 吸収能を持つと考えられているためである（Zachara *et al.*, 1991）．都市下水灌漑農地の Pb を除いた重金属の Exch 画分は地下水灌漑農地より有意に高く，Ni においては 670 倍，Cu においては 10 倍，Cd においては 2.8 倍であった．しかしながら，DTPA 抽出含量と同様に全含量に対する割合は小さく，ほとんどの試料において 5%以下であった．都市下水灌漑農地においては Mno/Feo 画分において，全ての測定した重金属において地下水灌漑農地よりも有意に高く（ $p < 0.05$ ），OM 画分においては Ni を除き全ての重金属において同様な傾向を示した．Mno/Feo 画分および OM 画分の CF 値を比較したところ，Cr および Pb，Zn における Mno/Feo 画分の方が高かった．これらの重金属は本調査地域において都市下水灌漑の影響を最も受けていた重金属である．インド国，西ベンガル地域における長期間の都市下水灌漑では，Cd および Cr，Cu，Pb の Mno/Feo 画分が増加していた（Bhattacharyya *et al.*, 2008）．Sheppard and Thibault（1992）は Pb および Cr 硝酸塩の 4 年間の連用試験により，Mno/Feo 画分が最も増加したと報告している．工業廃水を灌漑した農地においても，Cd および Cr，Pb，Zn の Mno/Feo 画分が増加していた（Bose *et al.*, 2008）．同様に，15 年間の汚泥連用による Ni および Pb，Zn の Mno/Feo 画分が増加（Sloan *et al.*, 1997），工業廃水汚泥の 8 年間の現場実証によっても Ni の Mno/Feo 画分の

表 24 都市下水灌漑農地（WWF）および地下水灌漑農地（GWF）の表層土（0～10 cm）の各化学的形態における重金属含量および汚染指数（CF）

		Exch	Carb	Mno/Fe		OM	Res			回収率 ^a			
		mg kg ⁻¹											
Cd	WWF	0.11	c	0.58	a	0.54	a	0.24	c	0.31	b	99.1%	-
	GWF	0.04	c	0.70	a	0.45	a	0.16	c	0.37	b		
	CF	2.75	**	0.83	N.S.	**	**	**	**	**	**		
Cr	WWF	0.1	d	0.9	d	18.2	c	29.0	b	75.3	a	108.9%	
	GWF	trace	d	0.8	d	4.9	c	16.0	b	80.7	a		
	CF	1.13	*	3.71	N.S.	3.71	**	1.81	**	0.93	*		
Cu	WWF	0.10	d	0.5	d	12.7	b	7.2	c	25.1	a	102.8%	
	GWF	0.01	d	0.5	d	11.6	b	4.3	c	24.7	a		
	CF	10.00	*	1.13	N.S.	1.09	*	1.67	**	1.12	N.S.		
Ni	WWF	0.2	d	2.9	c	23.4	b	30.5	a	29.4	a	91.3%	
	GWF	trace	d	3.0	c	20.6	b	29.3	a	29.8	a		
	CF	-	*	0.97	N.S.	1.14	**	1.04	N.S.	0.99	N.S.		
Pb	WWF	4.7	b	6.9	b	62.7	a	1.6	b	5.9	b	104.3%	
	GWF	4.0	b	7.7	b	26.3	a	0.8	c	6.7	b		
	CF	1.18	N.S.	0.90	N.S.	2.38	*	2.00	*	0.88	N.S.		
Zn	WWF	0.03	c	2.9	c	13.9	b	14.6	b	42.2	a	97.3%	
	GWF	trace	d	0.5	cd	4.3	c	9.1	b	45.0	a		
	CF	-	*	5.86	*	3.23	**	1.60	**	0.94	N.S.		

*, **, N.S.: t 検定による都市下水灌漑農地および地下水灌漑農地において有意差が 5% および 1%, 有意差なしをそれぞれ示す。

注釈: 異なるアルファベットは Tukey の多重分析によって, 都市下水灌漑農地 (WW) および地下水灌漑農地 (GW) 間に 5% 有意差があることを示す (n=18) .

^a 回収率 (%) = 各画分の合計 / 全含量 (HNO₃-HCl 分解) × 100

Exch は交換態画分, Carb は炭酸カルシウム結合態画分, Mno/Feo は Mn および Fe 酸化物結合態画分, OM は有機物結合態画分, Res は残渣画分をそれぞれ示す。

増加が報告されている (Sastre *et al.*, 2001) . Mn と Fe 酸化物は一般的に大きな比表面積を持つため、重金属の吸着および反応性が高いために重金属の長期間のシンクとして働いていたと考えられた。

4.2.3.2.3. 選択溶解法による Mn および Fe 酸化物結合画分の重金属

数々の酸化物に対する選択溶解法が考案されている (Mehra and Jackson, 1960; Shuman, 1982; Chao and Zhou, 1983; Loeppert and Inskeep, 1996) . 室温塩酸ヒドロキシルアミン溶解法によって抽出される重金属は、一般的に「Mn 酸化物結合態画分 (以下, RRO)」と考えられている (Shuman, 1982; Chao and Zhou, 1983; Han *et al.*, 2001) . 熱塩酸ヒドロキシルアミン溶解法は「非晶質性 Fe 結合態 (以下, Amor-Fe)」, さらに酸性シュウ酸-アスコルビン酸抽出は「結晶性 Fe 結合態 (以下, Cry-Fe)」と考えられている (Shuman, 1982 ; Han, 2006) .

Cry-Fe は全 Fe 含量のうち約 40%を抽出することができ、次いで Amor-Fe > RRO の順であった (表 25) . Amor-Fe 抽出として広く使用されている酸性シュウ酸性アンモニウム抽出法と熱塩酸ヒドロキシルアミン抽出法を比較した予備実験から、両者の抽出 Fe および抽出重金属に Pb を除き明瞭な違いが確認されなかったため、以下の結果および考察は熱塩酸ヒドロキシルアミン抽出法を Amor-Fe 抽出法として述べる。なお、Pb はシュウ酸と難溶性のシュウ酸鉛を形成したため、明瞭な違いがなかったと考えられた (Davidson *et al.*, 2004) . 選択溶解法によって抽出された Cr および Cu, Ni, Zn は Fe と同様に Cry-Fe > Amor-Fe > RRO の順であった (表 25) . 加えて、Cr および Mn, Pb はいずれかの溶解法により全量の 50%以上、Cu においては全量の約 50%が抽出された。Amor-Fe 溶解法による全 Pb 含量の平均 85%以上を抽出されたのに対して、Cry-Fe においては全含量のわずか 20%程度であった。これは一度抽出された Pb がシュウ酸と難溶性のシュウ酸鉛を形成したことにより濃度が低下したためと考えられた (Davidson *et al.*, 2004) . 全ての選択溶解法における抽出 Ni および Zn は都市下水灌漑農地において地下水灌漑農地よりも有意に高かった ($p < 0.01$) . Cr および Pb においては、RRO および Amor-Fe 溶解法において、都市下水灌漑農地において有意に高かった ($p < 0.01$) .

Cr の CF 値は Amor-Fe 溶解法において最も高かった。これは都市下水灌漑により集積した Cr は非晶質 Fe や結晶質 Fe の表面のような中程度の反応性を示す部位に吸収されたことが示唆された。Bradl (2004) によると、Cr (IV) の反応性は Fe 酸化物においてアルミ酸化物およびカオリナイト、モンモリロナイトよりも高く、Cr (III) においては Fe お

表 25 都市下水灌漑農地（WWF）および地下水灌漑農地（GWF）の表層土（0～10 cm）
 における全重金属含量に対する異なる Mn や Fe 酸化物画分中の重金属の割合および
 汚染指数（CF）

重金属	画分	WWF	GWF	CF	
		%			
Cd	RRO	34.50	34.02	1.01	N.S.
	Amor-Fe	29.74	26.46	1.13	N.S.
	Cry-Fe	33.79	39.19	0.86	N.S.
Cr	RRO	2.14	1.42	1.51	**
	Amor-Fe	14.15	5.08	2.78	**
	Cry-Fe	54.08	52.29	1.03	N.S.
Cu	RRO	4.88	2.87	1.70	**
	Amor-Fe	29.60	28.41	1.04	N.S.
	Cry-Fe	49.97	51.99	0.96	N.S.
Fe	RRO	1.35	0.79	1.73	**
	Amor-Fe	1.75	2.15	1.04	**
	Cry-Fe	37.41	44.42	0.96	*
Mn	RRO	56.19	50.62	1.11	**
	Amor-Fe	65.35	60.38	1.08	*
	Cry-Fe	45.78	52.52	0.87	**
Ni	RRO	9.33	7.47	1.25	**
	Amor-Fe	24.92	22.43	1.11	**
	Cry-Fe	41.01	33.49	1.22	**
Pb	RRO	67.36	45.14	1.49	**
	Amor-Fe	87.48	52.91	1.65	**
	Cry-Fe	21.76	20.08	1.08	N.S.
Zn	RRO	7.66	2.14	3.59	**
	Amor-Fe	16.35	6.81	2.40	**
	Cry-Fe	42.24	25.72	1.64	**

*, **, N.S.: t 検定による都市下水灌漑農地および地下水灌漑農地において有意差が 5% およ
 び 1%, 有意差なしをそれぞれ示す。

よび Mn 酸化物，粘土鉱物の表面に主に吸着された．電子顕微鏡による調査からも Cr (III) は Fe 酸化物表面に結晶として蓄積するのに対して，非晶質ケイ酸表面には結晶が生成されないことが確認されている (Fendorf *et al.*, 1996) . Barrow *et al.* (2012) による硝酸を用いた Fe 酸化物から Cr の脱着試験では，実際の Cr の脱着はモデルによる予測よりも早く生じ，Cr は酸化物表面付近に格子拡散 (lattice diffusion) によって保持されていると報告されている．以上より本調査地域において，都市下水によって蓄積した Cr は非晶質や結晶質 Fe の酸化物表面近傍に保持され，これらの吸着部位が長期間の Cr のシンクとして働いていたことが考えられた．

都市下水灌漑農地における Pb は，RRO と Amor-Fe 溶解法において有意に高く ($p<0.01$) ，両抽出 Pb は全含量の増加とともに増加していた ($p<0.01$; 図 20) . McKenzie (1980) は Mn 酸化物の Pb の吸着が Fe 酸化物の最大 40 倍まで生じると報告した．O'Reilly and Hochella (2003) は電子顕微鏡による構造分析並びに間隙特性と分光特性から同様の Mn 酸化物に対する Pb の吸着結果を得た．Xu *et al.* (2006) によると，Pb (II) は Fe のポリマー構造に短時間における置換は生じず，さらに，Fe 水酸化物の結晶化を最大 21 カ月妨げていたと報告している．以上より本調査地域において，都市下水による蓄積した Pb は Mn 酸化物と主に結合態を生じており，一部 Fe などの酸化物と結合している可能性が考えられた．

都市下水灌漑農地における Zn は全ての溶解法において全含量と正の相関を示した ($p<0.01$) . 土壌に Zn を付加した実験は，初め，付加 Zn は Exch 画分および Carb 画分に吸着されていたが，時間の経過とともに RRO および Amor-Fe に移行することと考えられている (Han *et al.*, 2001) . イラン国の石灰質土壌においても同様に培養時間の経過とともに Zn が RRO および Amor-Fe に移行することが報告されている (Jalali and Khanlari, 2008) . 以上より本調査地域において，都市下水による蓄積した Zn は時間の経過とともに Mn 酸化物や Fe 酸化物と吸着し，これらの吸着部位が長期間の Zn のシンクとして働いていることが考えられた．

Mno/Feo 画分は Exch 画分および Carb 画分よりも可給性や環境における移動性は低いと考えられている (Narwal *et al.*, 1999; Sánchez-Martín *et al.*, 2007) . それゆえ，長期間の都市下水の灌漑によって土壌に重金属は集積していくが，主に負荷された重金属は Mn および Fe 酸化物による吸着していた．これらの画分の重金属は Exch 画分および Carb 画分と比較して可給性や環境における反応性が低いことによって DTPA 抽出される重金属が少なかった理由だと考えられた．しかしながら，Pb は RRO に多く存在していたことから，

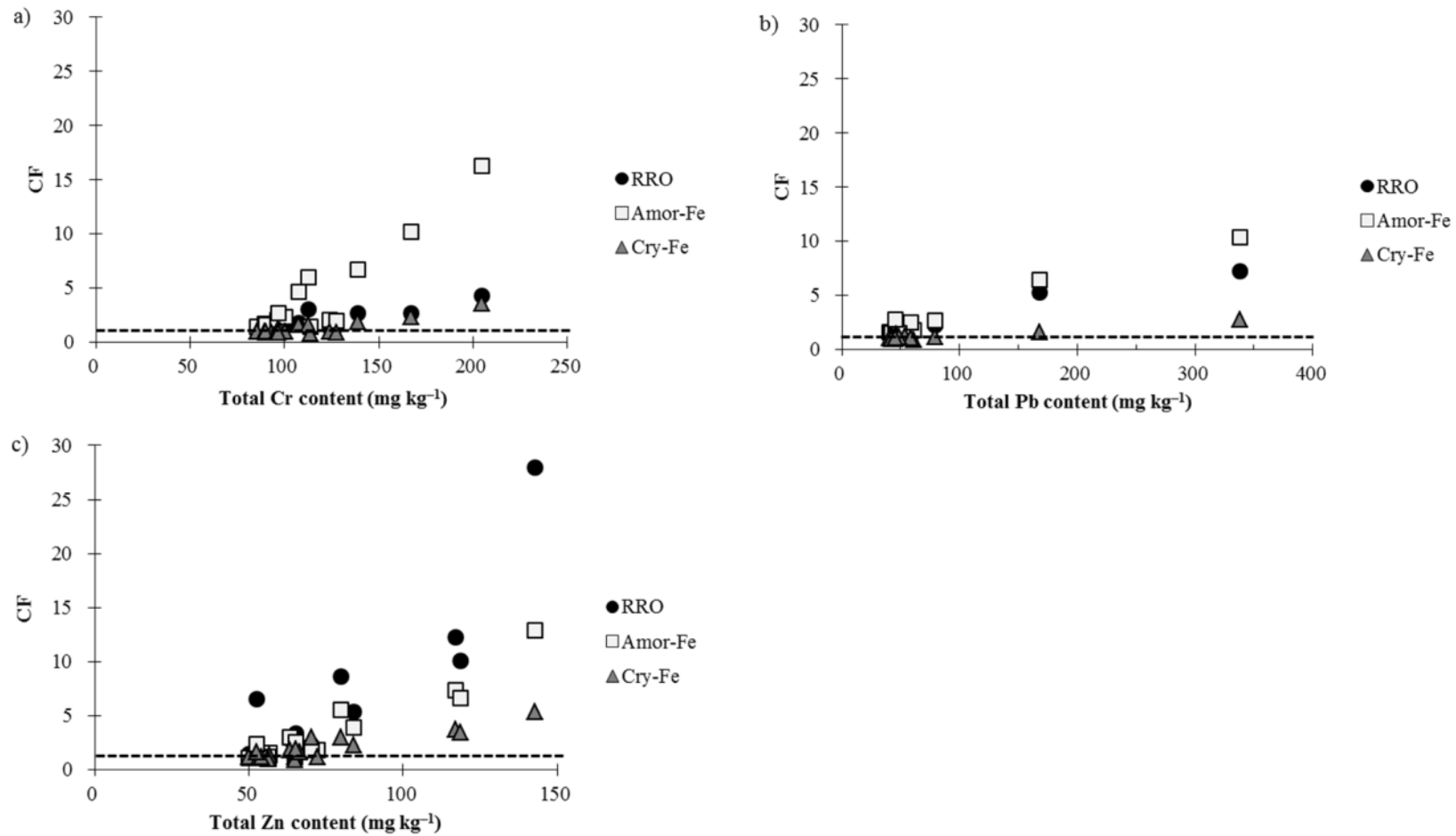


図 20 都市下水灌漑農地における異なる Mn および Fe 酸化物の溶解法による全含量に対する汚染指数 (CF) との関係
 (a) Cr, (b) Pb, and (c) Zn. 破線は都市下水灌漑農地の平均値である低汚染汚染指数=1 を示す.

長時間の還元状態に晒されると可給性や移動性を高める可能性があり、粗暴な表層灌漑などを行うと Pb の植物体への移行の危険性が高まる可能性が示唆された。

4.2.3.3. 小麦子実および茎葉中の重金属含量

小麦子実および茎葉中の重金属含量はそれぞれ、 $Zn > Cu > Ni > Cr > Cd > Pb$ および $Cu > Zn > Ni > Cr > Cd > Pb$ の順であった。ほとんどの子実において Pb は検出下限以下 ($< 0.1 \text{ mg kg}^{-1}$) であった。Cd および Pb は人体および家畜への健康被害が懸念されている。コーデックス委員会 (FAO and WHO, 1984) は小麦子実の Cd および Pb 含量に対して 0.20 mg kg^{-1} の基準値を、欧州委員会 (European Commission, 2002) は小麦の茎葉中の Cd および Pb 含量に対して、それぞれ 1.0 mg kg^{-1} および 5.0 mg kg^{-1} 基準値を設けている。本調査地域の都市下水灌漑農地 18 圃場から採取された小麦はどちらの基準も超過していなかった。しかし、Pb においては 3 圃場においてこれらの基準を超過していた。この高 Pb 含量の小麦が栽培されていた土壌は全 Pb 含量および DTPA 抽出 Pb 含量が高い傾向にあった。

子実中の Zn を除いた重金属は可給態含量と有意な相関関係 ($p > 0.05$) は確認されなかったが、Cd および Cu, Pb, Zn においては正の相関関係を示した (図 21)。茎葉中の重金属は土壌 pH および有機物含量、全含量と相関関係があった (図 22)。それゆえ、これらの分析値が地下水灌漑農地よりも都市下水灌漑農地が相対的に高いため (表 16, 18, 19), 都市下水灌漑農地の作物は地下水灌漑農地の作物より重金属含量が高い可能性が示唆された。Russan *et al.* (2007) は最大 10 年間の都市下水の灌漑利用によって作物 Pb および Cd が高まることを報告した。加えて、他の研究においても都市下水灌漑農地において栽培された作物は地下水灌漑農地よりも多くの重金属を集積していた (Kiziloglu *et al.*, 2007; Qishlaqi *et al.*, 2008; Gupta *et al.*, 2010)。

4.2.4. 結論

都市下水が主体的なクウェイック川においては、未処理の皮なめしや毛織産業からの工業廃水による Cr の混入が疑われた。25 年以上この灌漑水を使用している農地においては土壌全 Cr および Zn 含量、可給態 Cd および Cu, Ni, Zn 含量が地下水灌漑農地よりも有意に高かった。

都市下水灌漑が土壌重金属に及ぼす影響を明確化するために、逐次抽出法を用いて土壌重金属の化学的形態を調べた。重金属の主要な化学的形態は、Cd は Carb 画分、Pb は Mno/Feo 画分、Cr および Cu, Zn は Res 画分、Ni は OM および Res 画分であった。Cd は

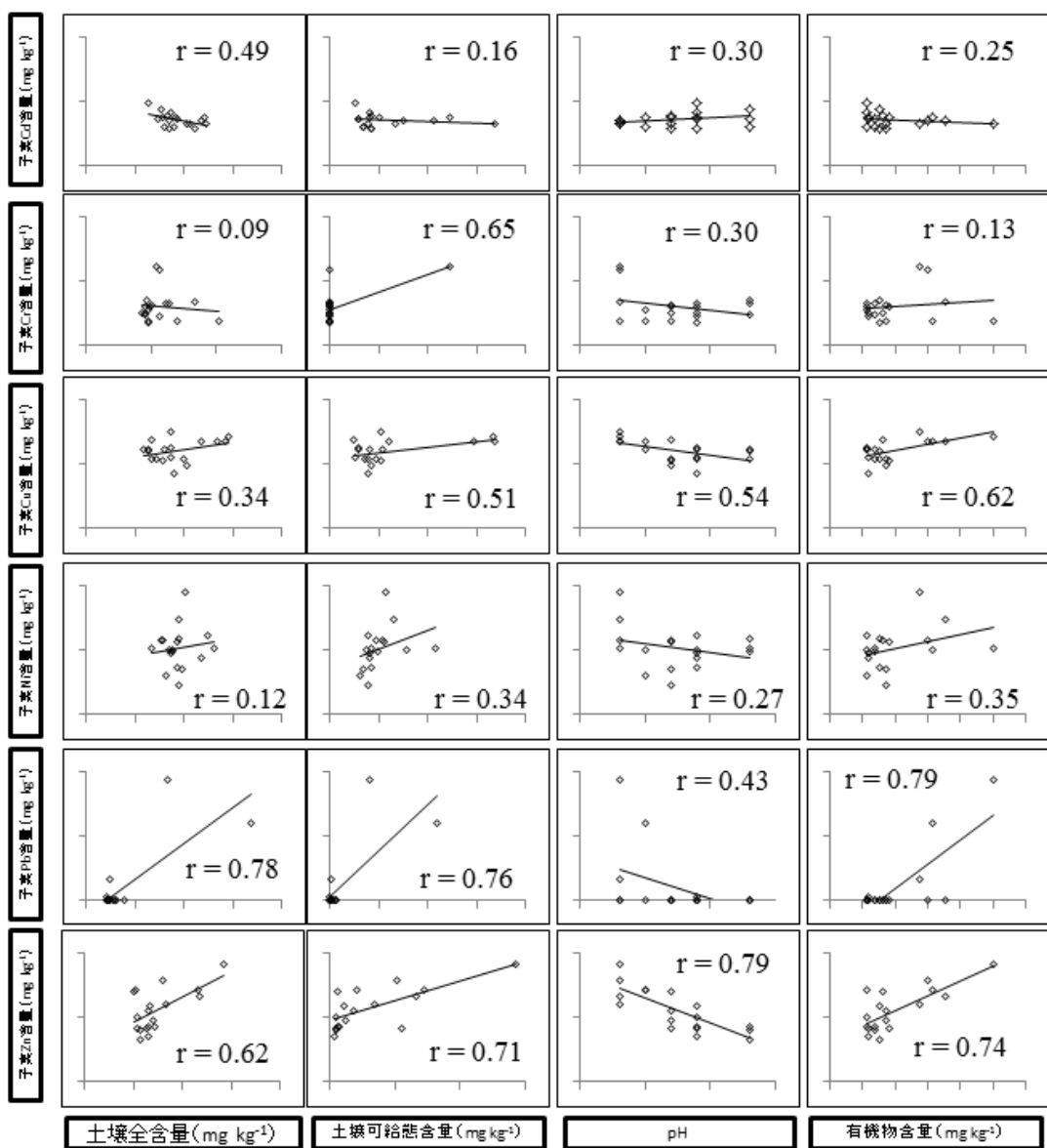


図 21 小麦子実中の重金属含量および土壌重金属全含量，可給態含量，pH，有機物含量との相関関係

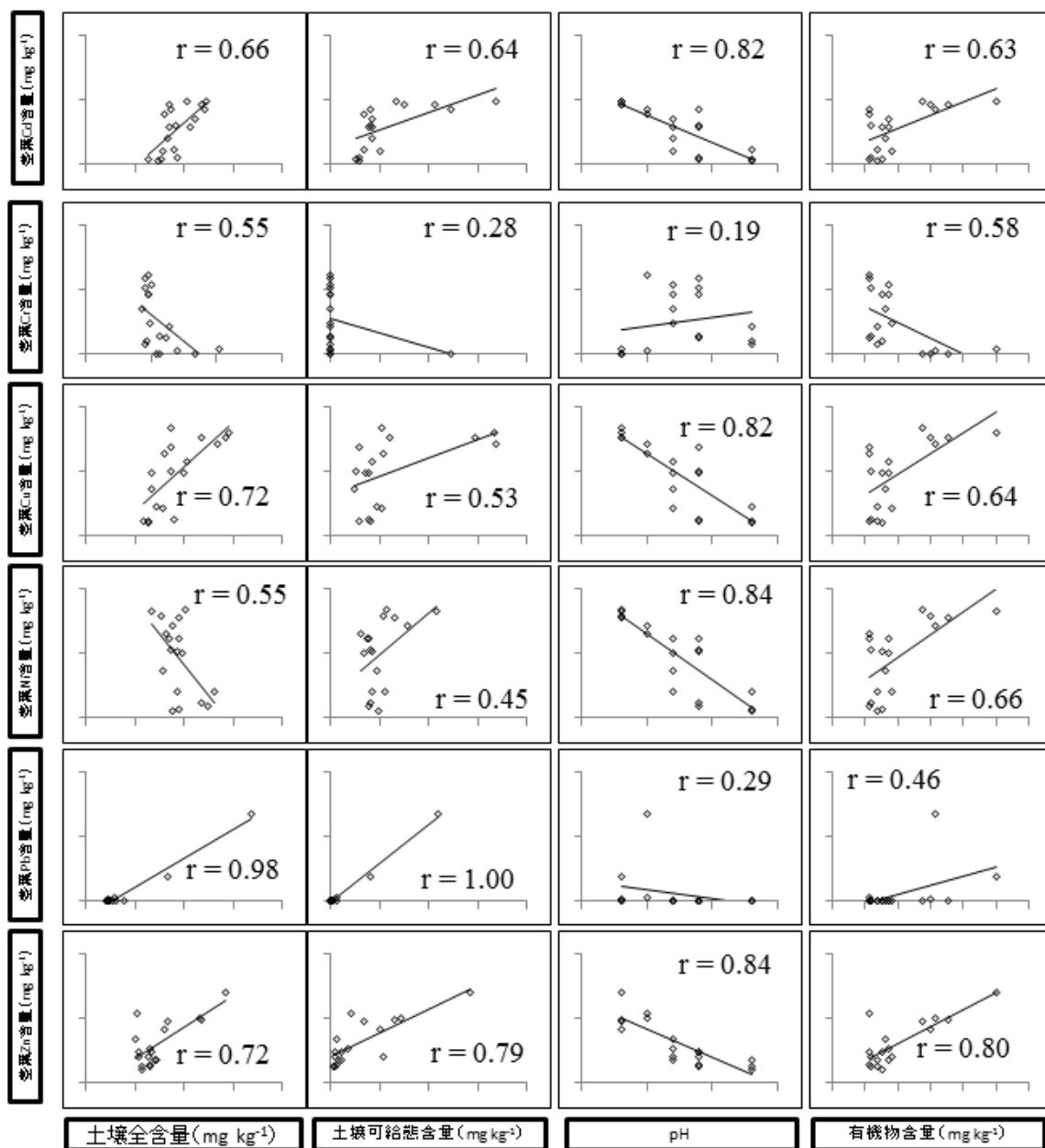


図 22 小麦茎葉中の重金属含量および土壤重金属全含量，可給態含量，pH，有機物含量との相関関係

Carb 画分が主要な形態であったことは、土壤中の移動性が高い形態であると考えられた。そのため、Cd は都市下水灌漑によって安定的な画分に移行していなかった。全ての重金属の Res 画分における都市下水灌漑および地下水灌漑農地における含量が同程度であった一方、都市下水灌漑農地において、Ni を除く全ての重金属において OM および Mno/Feo 画分において、地下水灌漑農地よりも有意に高かったことを明らかにした。OM および Mno/Feo 画分は Exch および Carb 画分よりも相対的に移動性および可給性が低いと考えられている。つまり、長期間の都市下水灌漑によって、土壌 Cd, Cr, Cu, Ni, Pb および Zn の移行が生じ、Cr, Cu, Ni, Pb および Zn においてより安定的な画分に移行したと考えられた。

選択溶解法の結果より Cr は Amor-Fe, Pb は RRO, Zn は RRO および Amor-Fe, Cry-Fe が都市下水灌漑による主要な重金属シンクとして働いていたと考えられた。これらの結果は Mn および Fe 酸化物が付加された重金属の吸着に大きく寄与していたと示唆された。

植物体の Cd 含量はコーデックスや欧州委員会の基準値以内であった。ほとんどの Pb は基準値以内であった一方、3 試料において基準を超過していた。これらの試料は DTPA 抽出態 Pb および全 Pb 含量の高い土壌において生育していた。

以上より、本調査地域においては長期間の都市下水灌漑によって土壌へ重金属が蓄積していた一方、Fe や Mn 酸化物によってその危険性は軽減されていたと考えられた。その結果、DTPA 抽出態の重金属量が相対的に少なく、植物体中に過剰に吸収されなかったと示唆された。しかし、高濃度に蓄積した土壌においては植物への高濃度の吸収されていたため、下水の処理は必要であると考えられた。下水処理が十分に機能していない現状においては、灌漑水量を減らし農地に負荷される重金属を減らすことや、多くの重金属を含む浮遊物質の除去等は有効な対策であると示唆された。また、高濃度に重金属が汚染されている土壌においては、非食用植物を栽培することにより消費者への重金属の混入を防ぐことも対策として考えられた。

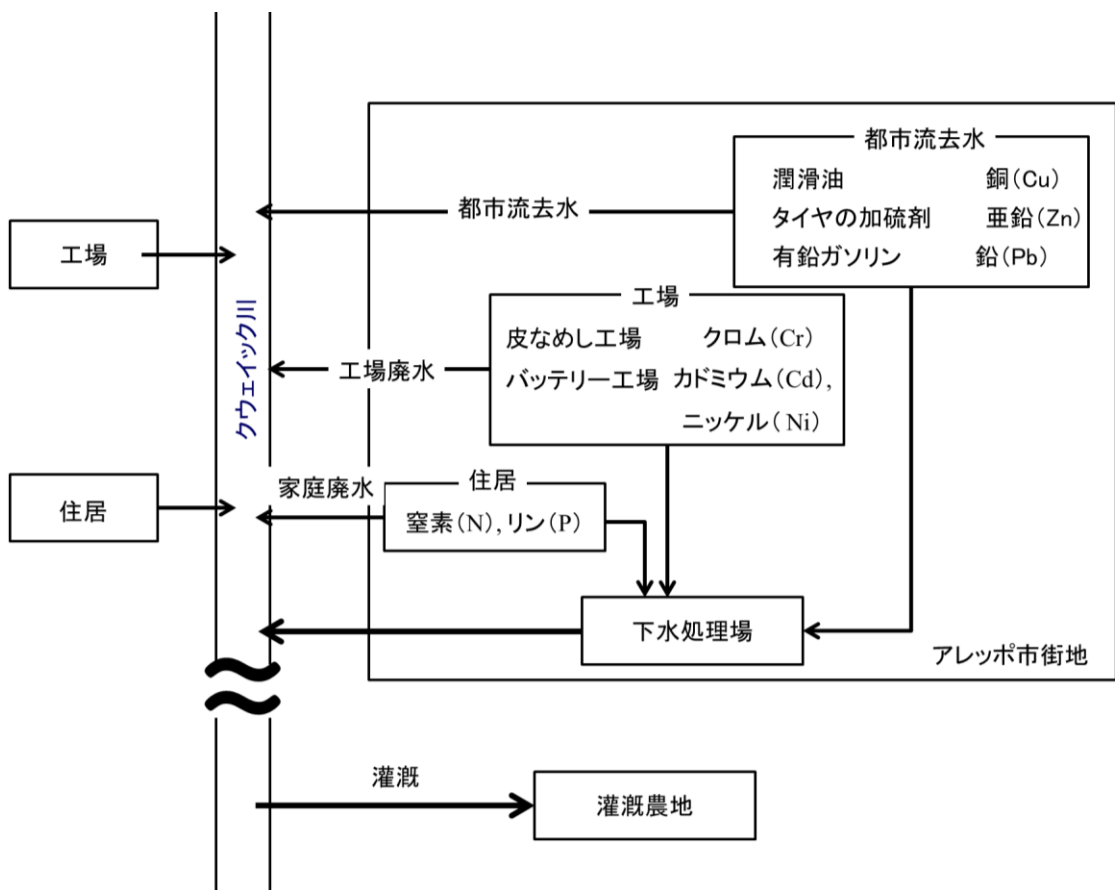


図 23 クウェイック川における汚染源の模式図

第5章 総合考察

本章では、第2章から第4章までに得られた結果を総合し、今後、都市下水の農業利用が増大すると考えられる中東および北アフリカ地域を中心として、長期間の都市下水灌漑が農業環境に与える影響を論じ、都市下水の農業利用の適切な総合管理法の在り方を提言した。

本研究では、第2章は既存の報告を基に世界の国や地域における都市下水の生成、処理および処理下水の再利用量をそれぞれ明らかにした。第3章では、都市下水から水資源への変換可能な存在量を把握するために、世界の各地域における都市下水の生成および処理量を推定する手法を開発し、その精度を検討した。第4章では、都市下水の農業利用が増大していく地域において、長期間の都市下水灌漑利用が農業環境に及ぼす影響を明らかにした。そのため、本章では、最も規模の小さいシリア国北部乾燥地域における長期間の都市下水灌漑利用に関する総合考察をはじめに行い、続いて、中東および北アフリカ地域における長期間の都市下水灌漑利用に関する総合考察をし、最後に世界における都市下水の有用性を考察した。

5.1. シリア国北部乾燥地域における長期間の都市下水灌漑利用に関する総合考察

アレppo近郊地域から排出される家庭および工業廃水並びに都市粉塵を含む都市流去水がクウェイック川に処理および未処理のまま混入している（図23）。そのため、窒素やリンは家庭廃水から、Crの混入はアレppoにおける主要産業の一つである皮なめしや毛織産業からの流入が考えられた（Muruganathan *et al.*, 2004; Song *et al.*, 2004）。Pbは有鉛ガソリンから、CuおよびZn、Cdは自動車製品やタイヤ、潤滑油、工場からの廃水がそれぞれ原因であると言われている（Othman *et al.*, 1997; Wilcke *et al.*, 1998; Möller *et al.*, 2005）。

都市下水の長期灌漑利用農地の調査結果より、調査地域において土壌塩類化の危険性は低く、調査農地も土壌塩類化は進行していなかった。窒素やリンは家庭廃水からの混入が考えられ、さらに、アレppoの処理場において処理効率が低いため、養分負荷量は典型

的な小麦栽培の都市下水灌漑によって、1 ha あたり窒素肥料として 110~270 kgN, リン肥料として 25~60 kgP 供給することが可能だと考えられた。これらの値はシリアにおける標準的な小麦栽培を都市下水に含まれる養分によって窒素は全量, リンは施肥量の半分を賄うことが出来ると試算された。加えて, 当地域の農家の多くは化学肥料の更なる施与も行っているため, 土壌への養分の蓄積が生じている可能性が示唆された。そのため, 当地域においては都市下水の養分供給能を考え, 新たな施肥基準を定めることによって, 都市下水の利用による経済的利益を増加できると考えられた。

皮なめしや毛織産業からの Cr や有鉛ガソリンからの Pb, 自動車製品やタイヤ, 潤滑油, 工場からの混入により, 都市下水の長期間の灌漑利用によって土壌重金属は蓄積傾向にあった。しかし, 都市下水由来の重金属は Mn や Fe の酸化物と結合態を形成することにより, 可給性を緩衝していることが示唆された。当地域の土壌は地中海地域に広く分布するヘマタイト様物質やフェリハイドライトを多く含んでいる土壌であると考えられた (Torrent and Barrón, 2003)。そのため, 同様の緩衝能は MENA 地域の多くの土壌において有する可能性が示唆された。しかし, 長期の都市下水の灌漑利用によって重金属は確実に集積しているため, 重金属の混入を抑えることが必要であると考えられた。当地域の場合, 皮なめしや染色を含む毛織産業からの Cr の混入が示唆されていることから, これらの産業からの廃水を分離, 処理する必要があると考えられた。また農家における対策としては, 灌漑水中の Cr が TSS 画分に含まれていたことから, 濾過装置の利用や沈砂池による TSS 画分の除去によって農地への重金属混入量を減らすことができると考えられた。大腸菌群の混入はシリアの国内基準 (SASMO) を大きく上回り, 深刻な汚染が確認された。また, BOD₅ や COD も高い値であり, アレッポの下水処理場による処理効率が低いことが示唆された。Grangier *et al.* (2012) によると, 本調査と同一の都市下水灌漑地域における子供の健康被害が地下水灌漑農地よりも有意に高く, その結果, 都市下水灌漑農地においては, 1.7 倍の年間医療費が生じていた。しかし, 農家は都市下水灌漑から得られる利益がそれ以上であることや水資源がひっ迫していることから, 都市下水を農業利用が行われていた (Qadir, 2008 ; Grangier *et al.*, 2012)。そのため, 農家は今後も都市下水の利用を続けていくと考えられ, 都市下水による影響を減少させるため衛生教育の拡充が必要であると考えられている (Grangier *et al.*, 2012)。さらに, 下水処理場の処理能力が著しく低いことから, 下水処理場の消毒過程の能力を重点的に向上させることも有効であると考えられた。

5.2. 中東および北アフリカ地域における長期間都市下水灌漑の環境影響評価

MENA 地域はこの 10 年間に於いて最も人口が増加した地域かつ水資源が最もひっ迫している地域であり、都市下水は重要な水資源である (Bahri, 2008 ; WB, 2013). さらに、IPCC (2006) による今後の予測も水資源量の減少および需要の増加を予測している。特に、MENA 地域の都市下水の処理割合は既存の報告によると 51%であった。今回の推定からも 2010 年において 44%と見積もられていることから、多くの未処理水が環境中に放出され、農業に利用されていると示唆されている。また、都市下水の生成量と比較して処理量は、経済発展よりも遅れて増加する傾向があり、今後もこの状況は続くと考えられた (図 24)。さらに、MENA 地域の下水処理能力は先進国と比較しても低いと考えられている (Qadir *et al.*, 2012)。その結果、未処理もしくは不十分な処理しかされない都市下水の農業利用は今後も増加すると考えられた。そのため、水資源がひっ迫しすでに都市下水を長期間使用しているアレppo近郊地域の事例は今後の MENA 地域において、長期間の都市下水の灌漑利用がもたらす影響を示すベンチマークになりえると考えられた。MENA 地域における個別の状況や対策はその国および地域の経済状態や費用対効果によって決められなければならないが、アレppo地域における事例を基に、被害の広がりや対策の難易、緊急性を考慮すると都市下水を安全に農業利用するための対策の優先順位は概して、病原菌汚染、重金属汚染、肥料分の蓄積の順であると考えられた。

肥料分の蓄積とは都市下水灌漑によって相当量の窒素やリンが供給され、植物の品質低下や雑草の繁茂、成熟期の遅れなどをもたらす土壌への養分の蓄積のことである。この対策として、都市下水由来の肥料成分を考慮した新たな施肥量の検討によって、肥料にかかる費用を安価に抑えかつ植物の質の低下を最小限にできると考えられた。肥料分の蓄積の優先順位が高くない理由として、施肥量に対する作物の要求量や収量などは多くの知見があり結果の転用が比較的容易であること、土壌への養分蓄積は長期間の利用によって生じていくと考えられるためである。

重金属汚染の優先順位は中～高であると考えられた。その理由として、重金属は一度土壌に蓄積すると植物によって持ち運ばれる量が少なく原状回復に多大な労力が必要とすること (Page and Chang, 1985)、一部の重金属は人体や環境に悪影響であること (FAO/WHO, 1984; WHO, 2006; Dreschel *et al.*, 2010) が考えられた。その一方で、蓄積量が少ないため一般的な農地においては基準を超えるのに長い期間必要とすること (Qadir and Scott, 2010) や Fe や Mn 酸化物によって植物の可給性低下が示唆されたためである。排出源の高濃度の重金属処理を行うことが重金属除去には効率的でありかつその効果も高

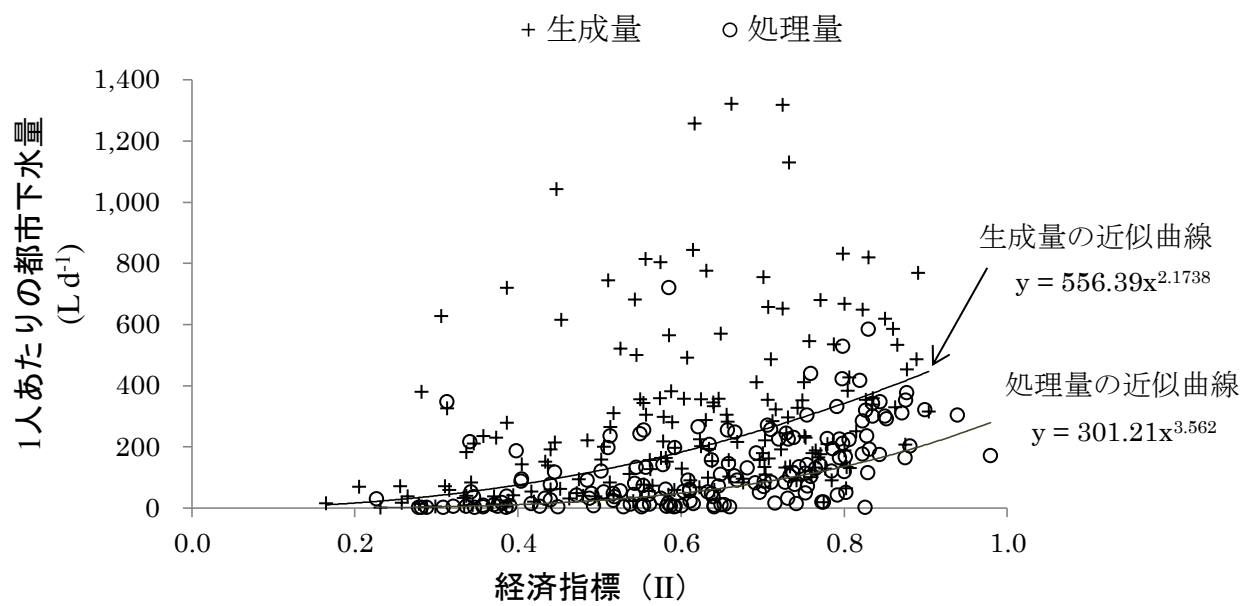


図 24 各国の都市下水生成量，処理量および経済指標との関係性

く、汚染者負担の原則からも排出源における処理が望まれる。しかし、MENA 地域の多くの処理場においては工業および生活廃水が混入しており、処理条件の検討として、低濃度条件における重金属処理法が今後必要になってくる可能性が考えられた。

病原菌汚染に対する優占順位は高いと考えられた。2001 年における MENA 地域の死亡理由の第 5 位が下痢性疾患であり、未処理もしくは不十分な処理都市下水は大腸菌群を始めとした種々の病原菌の媒介経路の一つである (Mathers *et al.*, 2006; Qadir and Scott, 2010; Grangier *et al.*, 2012)。シリア北西部乾燥地域においても多くの子供の健康被害が報告されており、下水道処理場の消毒過程の能力の向上および衛生教育の拡充が必要であると考えられた。今後、増大する未処理もしくは不十分な処理都市下水の灌漑利用は更なる水系疾患の疾病率を高める要因になりえるため、公衆衛生の対応が早急に求められると考えられた。

最後に都市下水の水質は家庭および工業廃水の相対的な割合に大きく影響されるため、水質調査は継続して行う必要があると考えられた。MENA 地域において、以上の点を留意し都市下水の灌漑の利益を最大限に、不利益を最小限にすることがこの地域の水資源の管理およびその有効性を高めるために必要であると考えられた。

5.3. 世界の都市下水の農業利用の有用性

世界的には都市下水の処理割合は既存の報告において、50%程度であるがその国の経済状況によって大きく異なっていた。特に低所得国においては、生成量のわずか 8%と報告されている。都市下水の再利用による動因は先進国の湿潤地域においては、都市下水は農業よりも工業目的や都市の樹木への灌漑などの様々な利用目的に使用されていた。先進国の乾燥地域においては農業と家庭、観光業との水の競合により主に農業利用されていた。発展途上国においては不十分な下水処理のため、都市下水中に豊富な肥料成分が含まれており、水が豊富にある場合でも農家はその肥料成分と経済的な利点によって灌漑利用を積極的に行っていた。

世界の年間都市下水生成量は 2000 年には 460 km³、2010 年には 579 km³と推定した。これは、世界の農業取水量の約 20%に相当する。国別にみた場合、半数以上の国において農業用水取水量の 50%以上に相当することが推定された。それゆえ、都市下水は豊富な水資源になりうると考えられた。主要国などにおける都市下水の水質(付表 1)を基にすると、各経済区分による都市下水処理場の流入水および流出水の水質は表 26 のようにまとめられた。この水質および今回の都市下水の推定値を基に肥料換算すると世界における都

表 26 各経済区分別の都市下水の水質特性

(引用文献は付表 1 による)

	低所得国		上位中所得国		高所得国	
	下位中所得国		流入水	流出水	流入水	流出水
	流入水	流出水				
BOD ₅	390.0	266.9	401.4	48.7	174.3	13.3
COD	785.3	289.1	696.6	207.9	411.5	62.8
TSS	372.0	239.4	285.0	77.9	223.9	25.6
全窒素	67.3	35.8	52.2	39.6	32.7	12.3
全リン	8.6	7.2	8.7	5.2	7.7	3.1

市下水の潜在的な養分は、窒素において 26.76 Tg, リンにおいて 4.77 Tg と換算された。第 2 章における経済区分による都市下水の処理割合および本研究による推定割合 (第 3 章) とすると, それぞれ窒素として 21.20~22.98 Tg, リンとして 3.61~3.96 Tg であった。これらの概算値は世界の窒素肥料として約 20%, リン肥料として約 10%の肥料分に相当する。そのため, 都市下水の農業利用は養分の循環からも有用であると考えられた。

都市下水の農業利用は農業取水が多い発展途上国においては, 競合しない水資源および補足的な土壌肥料供給源として有用な手段であると考えられた。都市下水の農業利用の利益を最大限に, 危険性を最小限にするためには適切な処理は必須であると考えられる。しかし, 一人あたりの都市下水生成量および処理量は経済発展すると増加する一方, 生成量に対して処理量の増加は鈍い (図 24)。そのため, 人口が急増している現状において未処理水の放出は増加すると予測された。よって, 適切な処理を行った都市下水の農業利用を進める一方, 処理が十分に行われていない下水を利用する場合の管理や運用法の優先順位を経済, 農業, 環境, 疫学的な側面から明らかにし, 対応していく必要があると考えられた。特に都市下水農地の環境影響評価はその地域の都市下水の特性を明らかにするためには必須の情報であると考えられた。加えて, 都市下水の水質は経済および都市の発展により, 工業および生活廃水の相対的な割合に大きく影響を受けるため, 継続的な調査が望まれる。

処理が十分に行われていない都市下水を農業利用する場合, 処理場の拡充を加速させる必要がある。しかしながら, 多くの発展途上国において, 財政的に余裕があるとは言えないため, 処理場の処理水準を先進国並みにするのではなく, 再利用の目的に応じた仕様を導入することが考えられた。例えば, 農業利用を前提にする場合は, 都市下水中の窒素やリンなどの肥料分を除くのではなく, 細菌類などの消毒過程を強化することが考えられた。さらに, WHO の基準および国別のガイドラインや規制をそのまま導入するのではなく, 柔軟に適応することによって, その地域に適した基準の導入が考えられた。そのためには, 都市下水の複雑な事象 (図 25) を取り扱う人材育成および機構の設置, あわせて研究者や政策立案者の協力体制の構築が必要であると考えられた。最後に各国, 地域, 世界における都市下水に関する量的なデータは十分ではなく, 現実の情報には大きな開きがあった。これらの基礎情報は政策立案者や研究者, 実務者, 政府機関による廃水処理を目指す国家行動計画や法律, 規則の基準値策定, 農業における都市下水の効率的な利用のために必要な投資だと考えられた。

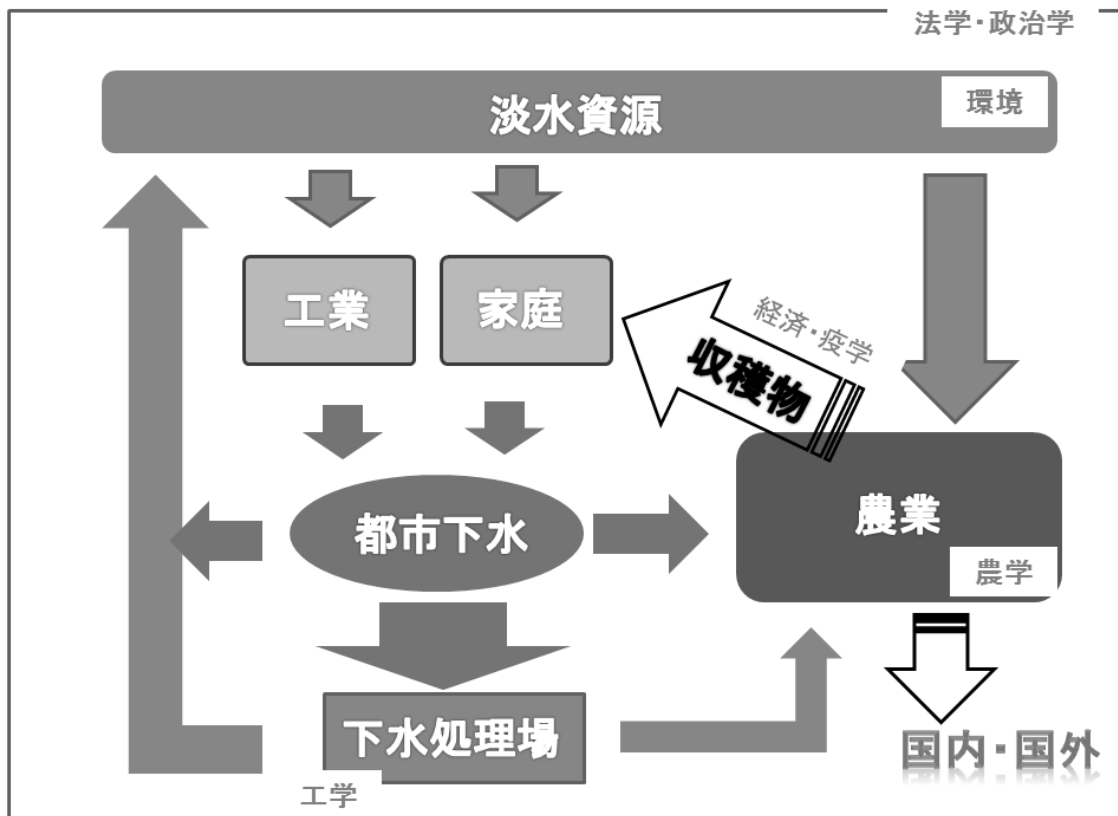


図 25 都市下水の農業再利用に関する模式図

学問分野はそれぞれの領域において役割を期待される分野を示す。

第6章 要約

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できなかつたため、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^3 、2010 年には 579 km^3 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^{-1} 、リンは 4.8 Tg yr^{-1} 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もち、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^3 （農業取水の 8%）、2010 年に 23.5 km^3 （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 (BOD₅), 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, BOD₅ 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 (5,000 m³ ha⁻¹) 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。さらに、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。したがって、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。

Summary

This work aimed to evaluate and support establishment of safe wastewater usage for agricultural production. The studies specifically focused on clarifying the quantities of wastewater for potential and actual utility as an irrigation water resource, and the environmental impact in the most challenged region for the wastewater irrigation, the Middle East and North African region.

1. Regional (Middle East and North African region) and global estimation of wastewater generation and treatment

Despite several studies and reviews highlighting the significance of wastewater irrigation, information on the quantity of wastewater being produced and treated at global and regional scales is limited. Our objective was to estimate global wastewater generation and treatment volumes by using the available data in published or electronic forms. The estimations were calculated by multiple regressions. The factor for generated wastewater used by urban population, economy and urban precipitation indices. The indicators for treated wastewater were calculated by urban population, economy, sanitation and urban development indices. Model efficiency for wastewater production was 0.92, and 0.75 for wastewater treatment. The data are sufficient to estimate for countries for which no data available. Total global wastewater generated was estimated at 460 km³ in the year of 2000 and 579 km³ in the year of 2010. The estimated wastewater generation was equivalent to 20% of global water withdrawal for agriculture. The global nitrogen and phosphorus in the wastewater were estimated at 26.8 Tg yr⁻¹ and 4.8 Tg yr⁻¹, respectively. Thus, wastewater is recognized as having high potential for agricultural use as both a water and mineral nutrient resource in water scarcity areas and developing countries.

In the water scarce Middle East and North Africa region, the wastewater production was estimated at 18.6 km³ (8% of the regional water withdrawal for agriculture) in 2000 and 23.5 km³ (12%) in 2010. The untreated or inadequately treated wastewater was the typical disposal form in the region. Farmers in the region have relied on the untreated or insufficiently wastewater as irrigation water source. Therefore, irrigation with untreated or insufficiently wastewater has a concern for public health, especially heavy metal and biological contamination.

2. Effect of long-term wastewater application on the environment in Aleppo peri-urban areas, Syria

Though, several studies on wastewater irrigation have been conducted in the Middle East and North African region, information on irrigation with untreated or inadequately wastewater is completely lacking in some Middle East and North African countries, including Syria. This study

carried out an environmental impact assessment of long-term wastewater irrigation in Aleppo peri-urban areas. This study focused on water quality and the risks of nutrient loading and biological contamination, and heavy metal contamination in soils.

Water sampling from the Qweik River was done on monthly basis between 2009 and 2010. The analytical parameters were pH, total suspended solid (TSS), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), biological oxygen demand (BOD₅), chemical oxygen demand (COD) and coliforms. The surface soils (0-10 cm) were taken from the area that had been under wastewater irrigation for more than 25 years in peri-urban Aleppo, Syria, for assessing heavy metal ((cadmium (Cd); chromium (Cr); copper (Cu); nickel (Ni); lead (Pb); and zinc (Zn)) distribution in soils. The soils were analyzed for the soil heavy metals using total and available content, and chemical forms by sequential extraction methods.

Results showed high content of TN, TP, TSS, BOD₅, COD, and coliform in the Qweik River throughout the year. Under the current irrigation regime for wheat in the area (5,000 m³ ha⁻¹) irrigation water is estimated to supply all the nitrogen and over half the amount for phosphorus requirements that would usually be applied in form of commercial fertilizer. These findings suggested that the wastewater irrigation at the study site would pose high public health risks and a high-potential for nutrient-load. Total Cr, Pb and Zn in the wastewater irrigated soils were significantly higher than those of groundwater irrigated soils. The soil heavy metal fractionation data showed that the residual fractions of all the heavy metals were more or less the same in wastewater and groundwater irrigated soils. However, most of the heavy metals in wastewater-irrigated soils significantly increased in bound forms to oxides of Mn and Fe (MnO/FeO) or with soil organic matter fractions (OM) as compared to groundwater-irrigated soils, except for Ni ($p < 0.05$). The ratio of increase for MnO/FeO to total content was higher than those of OM. This was likely caused by poorly crystalline Fe oxide with relatively higher surface area which is capable of adsorbing the heavy metal. The Pb with higher potential to be absorbed by Mn oxide accumulated in the easily reducible fraction.

Summarily, this work clarified that global wastewater generation is equivalent to about 20% of global water withdrawal for agriculture and to 20% of nitrogen and 10% of phosphorus demand in the world. The long-term of wastewater irrigation in peri-urban areas of Aleppo showed that there is high potential for nutrient load being converted to the fertilizer, however, with a high risk for biological contamination, likely due to low efficiency of the wastewater treatment plant in Aleppo. In addition, long-term wastewater led to accumulation of heavy metals in the soil, mainly adsorbed onto Mn and Fe oxides. The MnO/FeO fractions are relatively less bioavailable and less mobile, but would pose risks of the heavy metal release from the solid phase into liquid phase, under anaerobic conditions.

引用文献

- Achiba, W.B., Gabteni, N., Lakhdar, A., Laing, G.D., Verloo, M., Jedidi, N. and Gallali, T. 2009, Effect of 5-year application of municipal solid waste compost on the distribution and mobility of heavy metals in a Tunisian calcareous soil. *Agr Ecosyst Environ* 130: 156–163.
- Al-Masri, M.S., Al-Kharfan, K. and Al-Shamali, K. 2006, Speciation of Pb, Cu and Zn determined by sequential extraction for identification of air pollution sources in Syria. *Atmos Environ* 40: 753–761.
- Amacher M.C. 1994, Nickel, cadmium, and lead. In: Method of soil analysis. Part 3, Chemical methods, In: Sparks *et al.* (eds), American Society of Agronomy/Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, pp 739–768.
- American Public Health Association (APHA). 2005, Standard methods for the examination of water and wastewater. APHA-AWWA-WWF, Washington, DC.
- Anderson, J., Bradley, J. and Radcliffe, J. 2008, Water reuse in Australia and New Zealand. In: Jiménez, B. and Asano, T. (eds) *Water Reuse: An International Survey of current practice, issues and needs*. IWA, London, pp 105-121.
- Angelakis, A.N. and Bontoux, L. 2001, Wastewater reclamation and reuse in European countries. *Water Policy* 3: 47-59.
- AQUAREC. 2006, Integrated concepts for reuse of upgraded wastewater: Report on integrated water reuse concepts. AQUAREC. EVK1-CT-2002-00130, Deliverable D19. RWTH Aachen University, Aachen.
- Asano, T., and Pettygrove, G.S. 1987, Using reclaimed municipal wastewater for irrigation. *California Agriculture* March-April: 15–18.
- Asano, T., Burton, F.L., Leverenz, H., Tsuchihashi, R. and Tchobanoglous, G. 2007, *Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications*. McGraw-Hill Professional, New York.
- Asian Development Bank (ADB). 2000, Environmental Profile of Tajikistan. ADB, Manila.
- Australian Bureau of Statistics (ABS). 2010, Water Account Australia 2008-2009. ABS, [http://www.ausstats.abs.gov.au/ausstats/subscriber.nsf/0/D2335EFFE939C9BCCA2577E700158B1C/\\$File/46100_2008-09.pdf](http://www.ausstats.abs.gov.au/ausstats/subscriber.nsf/0/D2335EFFE939C9BCCA2577E700158B1C/$File/46100_2008-09.pdf) (Accessed on 7 October 2011).
- Aziz, A.M. and Aws, A. 2012, Wastewater production, treatment and use in Iraq: Country report. Presented at the Second Regional Workshop of the Project 'Safe Use of Wastewater in Agriculture', 16-18 May 2012, New Delhi, India, <http://www.ais.unwater.org/ais/mod/page/view.php?id=62> (Accessed on 21 December 2012)
- Bahri, A. 2008, Water reuse in Middle Eastern and North African countries. In: Jiménez, B., Asano, T., (eds) *Water Reuse: An International Survey of current practice, issues and needs*. IWA, London, pp 27-47.

- Basandorj, D. 2002, Water Resource Management in Mongolia. In: the National Seminar on Water Quality Improvement, Ulaanbaatar, 12-13 June. Cited by: *Dore, G. and Nagpal, T. 2006, Urban Transition in Mongolia: Pursuing Sustainability in a Unique Environment. Environ: Sci. Policy Sustain. Dev. 48: 10-24.*
- Barrow, N.J., Brümmer, G.W. and Fischer, L. 2012, Rate of desorption of eight heavy metals from goethite and its implications for understanding the pathways for penetration. *Eur. J. Soil Sci.* 63: 389–398.
- Bashir, F., Kashmiri, M.A., Shafiq, T. and Tariq, M. 2009, Heavy metals uptake by vegetables growing in sewage irrigated soil: relationship with heavy metal fraction in soil. *Chem. Spec. Bioavailab.* 21: 199–209.
- Bennett, A.J. 2000, Environmental consequences of increasing production: some current perspectives. *Agri. Ecosys. Environ.* 82: 89-95.
- Bhattacharyya, P., Tripathy, S., Chakrabarti, K., Chakrabarti, A. and Banik, P. 2008, Fractionation and bioavailability of metals and their impacts on microbial properties in sewage irrigated soil. *Chemosphere* 72: 543–550.
- Bixio, D., Thoeye, C., De Koning, J., Joksimovic, D., Savic, D., Wintgens, T. and Melin, T. 2005, Wastewater reuse in Europe. *Desalination* 187: 89-101.
- Bixio, D., De heyder, B., Cikurel, H., Muston, M., Miska, V., Joksimovic, D., Schäfer, A.I., Ravazzini, A., Aharoni, A., Savic, D. and Thoeye, C. 2006. Municipal wastewater reclamation: where do we stand? An overview of treatment technology and management practice. *Water Sci. Tech. Water Supply* 15: 77–85.
- Bose, S., Jain, A., Rai, V. and Ramanathan, A.L. 2008, Chemical fractionation and translocation of heavy metals in *Canna indica* L. grown on industrial waste amended soil. *J. Hazard Mater.* 160: 187–193.
- Bradl, H.B. 2004, Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents. *J. Colloid Interf. Sci.* 277: 1–18.
- Brown, L.R. 2011, The New Geopolitics of Food. *Foreign Policy*, 4: 1-11.
- Butler, D. and Memon, F.A. 2006, Water demand management. IWA publisher, London.
- Bryck, J., Prasad, R., Lindley, T., Davis, S. and Carpenter, G. 2008, National database of water reuse facilities summary report. Water Reuse Foundation, Alexandria, Virginia.
- Center for International Earth Science Information Network (CIESIN)/Columbia University, International Food Policy Research Institute (IFPRI), The World Bank, and Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT): Global Rural-Urban Mapping Project, Version 1 (GRUMPv1) : Urban Extents Grid. Palisades, NY: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC). 2013, Urban extent (km³).

- http://sedac.ciesin.columbia.edu/data/set/grump-v1-urban-extents_2011. (Accessed on 13 January, 2013).
- Central Statistical Bureau of Latvia (CSBL). 2011, Database: Environmental protection. <http://www.csb.gov.lv/> (Accessed on 21 September 2011).
- Chao, T.T., and Zhou, L. 1983, Extraction techniques for selective dissolution of amorphous iron oxides from soils and sediments. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: 225–232.
- Cornish, G.A. and Kielen, N.C. 2004, Wastewater Irrigation – Hazard or Lifeline? Empirical Results from Nairobi, Kenya and Kumasi, Ghana. In: Scott *et al.* (eds) Wastewater Use in Irrigated Agriculture Confronting the Livelihood and Environmental Realities. CABI- IWMI-IDRC, pp 69-79.
- Cornel, P. and Meda, A. 2008, Water reuse in Central Europe. In: Jiménez, B. and Asano, T. (eds) Water Reuse: An International Survey of current practice, issues and needs. IWA, London, pp 122–141.
- CROSTAT, 2012. Public sewage system, 2011. http://www.dzs.hr/default_e.htm (Accessed on 21 December, 2012).
- CROSTAT. 2013, Public sewage system, 2010. http://www.dzs.hr/default_e.htm (Accessed on 13 January, 2013).
- Czech Statistical Office (CSO). 2012, Water Supply, Sewerage and Watercourses in 2010. http://www.czso.cz/csu/2012edicniplan.nsf/engpubl/2003-12-eng_r_2012 (Accessed on 21 December 2012).
- Danso, G., Drechsel, P., Wiafe-Antwi, T. and Gyiele, L. 2002, Income of farming systems around Kumasi. *Urban Agric. Mag.* 7: 5-6.
- Davidson, C.M., Hursthouse, A.S., Tognarelli, D.M., Ure, A.M. and Urquhart, G.J. 2004, Should acid ammonium oxalate replace hydroxylammonium chloride in step 2 of the revised BCR sequential extraction protocol for soil and sediment? *Anal. Chim. Acta* 508: 193-199.
- Deras, M.A.R. 2012, Wastewater production, treatment and use in El Salvador. Presented at the Forth Regional Workshop of the Project 'Safe Use of Wastewater in Agriculture', 11-13 December 2012, Lima, http://www.ais.unwater.org/ais/pluginfile.php/378/mod_page/content/127/EL_SALVADOR.pdf (Accessed on 21 December, 2012; in Spanish)
- Drechsel, P., Scott, C.A., Raschid-Sally, L., Redwood, M. and Bahri, A. 2010, Wastewater Irrigation and Health: Assessing and Mitigating Risk in Low-Income Countries. Earthscan-International Development Research Centre (IDRC)-International Water Management Institute (IWMI).
- Ensink, J.H.J., Mahmood, T., van der Hoek, W., Raschid-Sally, L. and Amerasinghe, F.P. 2004, A

- nation-wide assessment of wastewater use in Pakistan: an obscure activity or a vitally important one? *Water Policy* 6: 1-10.
- Environment Canada. 2010, 2010 Municipal Water Use Report: Municipal Water Use, 2006 Statistics. Environment Canada, Gatineau.
- European Commission. 2002, Directive 2002/32/EC of the European parliament and the council of 7 May 2002; on undesirable substances in animal feed. *Offc. J. Europ. Comm. L* 140: 10–21.
- European Commission. 2008, Environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludge on land: Final report, Part II: Report on options and impacts. Available at http://ec.europa.eu/environment/waste/sludge/pdf/part_ii_report.pdf. (Accessed on 30 December, 2012).
- European Environment Agency (EEA), 2009. Water resource across Europe: Confronting water scarcity and drought. EEA, Copenhagen.
- EUROSTAT. 2013a, Generation and discharge of wastewater. <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/environment/data/database> (Accessed on 13 January, 2013).
- EUROSTAT. 2013b, Water use balance. <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/environment/data/database> (Accessed on 13 January, 2013).
- Exall, K., Jiménez, B., Marsalek, J. and Schaefer, K. 2008, Water reuse in the United States and Canada. In: Jiménez, B. and Asano, T. (eds) *Water Reuse: An International Survey of current practice, issues and needs*. IWA, London, pp 68-104.
- Faruqui, N.I., Niang, S. and Redwood, M. 2004, Untreated Wastewater Use in Market Gardens: A case Study of Dakar, Senegal. In: Scott et al. (eds) *Wastewater Use in Irrigated Agriculture Confronting the Livelihood and Environmental Realities*. CABI- IWMI- IDRC, pp113-125.
- Federation Office of Statistics, Federation of Bosnia and Herzegovina (FOSFBH). 2010, *Statistical Yearbook 2010*. FOSFBH, Sarajevo.
- FOSFBH. 2012, *Statistical Yearbook 2012*. FOSFBH, Sarajevo.
- Flörke, M., Kynast, E., Bärlund, I., Eisner, S., Wimmer, F. and Alcamo, J. 2012, Domestic and industrial water uses of the past 60 years as a mirror of socio-economic development: A global simulation study. *Global Environ. Change*, 23: 144-156.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2003a, *Review of World Water resources By Country*. Water report 23. FAO, Rome.
- FAO. 2003b, *Fertilizer use by crop in the Syrian Arab Republic*. FAO, Rome.
- FAO. 2005, *Irrigation in Africa in figures: AQUASTAT Survey -2005*. Water report 29, FAO, Rome.

- FAO. 2010, Current world fertilizer trends and outlook to 2014. FAO, Rome.
- FAO. 2011, The wastewater database. http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_wastewater.html (Accessed on 21 September, 2011)
- FAOSTAT, 2012a. Resource STAT. <http://faostat.fao.org/site/405/default.aspx> (Accessed on 21 December 2012)
- FAOSTAT, 2012b. Pop STAT. <http://faostat.fao.org/site/550/default.aspx#ancor> (Accessed on 21 December 2012)
- FAO-AQUASTAT, 2012. Global information system on water and agriculture. <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm> (Accessed on 21 December 2012)
- FAO and World Health Organization (WHO). 1984, List of contaminants and their maximum levels in foods. CAC, Vol. XVII.
- Fendorf, S.E., Li, G. and Gunter, M.E. 1996, Micromorphologies and stabilities of chromium (III) surface precipitates elucidated by scanning force microscopy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 99-106.
- French Institute for the Environment (FIE). 2012, EA30: Sewage treatment: treatment and sludge (water and sanitation survey) <http://www.stats.environnement.developpement-durable.gouv.fr/Eider/series.do#> (Accessed on 21 December, 2012; in French)
- Funamiu, N., Onitsuka, T. and Hatori, S. 2008, Water reuse in Japan. In: Jiménez, B., Asano, T., (eds) *Water Reuse: An International Survey of current practice, issues and needs*. IWA, London, pp 373-386.
- García, L.E. 2006, Water Quality Issues in Latin America. In: Biswas et al. (eds) *Water Quality Management in the America*, Springer, pp 1-15.
- Guardiola-Claramonte, M., Sato, T., Choukr-Allah, R. and Qadir, M. 2012, Wastewater production, treatment and reuse around the Mediterranean region: Current status and main drivers. In: R. Choukr-Allah, R. Ragab, and R. Rodriguez-Clemente (eds) *Integrated Water Resources Management in the Mediterranean Region: Dialogue towards New Strategy*. Springer Science, Business Media Dordrecht, pp 139-174.
- Gupta, A.P., Narwal, R.P. and Antil, R.S. 1998, Sewer water comparison and its effect on soil properties. *Bioresource Techn.* 65: 171-173.
- Gupta, S., Satpati, S., Nayek, S. and Garai, D. 2010, Effect of wastewater irrigation on vegetables in relation to bioaccumulation of heavy metals and biochemical changes. *Environ. Monit. Assess.* 165: 169-177.
- Gomez, M.J.L., Campos, S.M. and Olarte, B.C. 2012, Wastewater production, treatment and use in Colombia. Presented at the Forth Regional Workshop of the Project 'Safe Use of Wastewater in Agriculture', 11-13 December 2012, Lima,

http://www.ais.unwater.org/ais/pluginfile.php/378/mod_page/content/127/COLOMBIA.pdf

(Accessed on 21 December, 2012; in Spanish)

- Gyampo, M.A. 2012. Wastewater production, treatment, and use in Ghana. Presented at the Third Regional Workshop of the Project 'Safe Use of Wastewater in Agriculture', 26-28 September 2012, Johannesburg, <http://www.ais.unwater.org/ais/mod/page/view.php?id=61> (Accessed on 21 December, 2012)
- Habbari, K., Tifnouti, A., Bitton, G. and Mandil, A. 2000, Geohelminthic infections associated with raw wastewater reuse for agricultural purposes in Beni-Mellal, Morocco, *Parasitology Int.* 48: 249-254
- Han, F.X. 2007, Biogeochemistry of trace elements in arid environments. Environmental pollution 13. Springer, Dordrecht, the Netherlands.
- Han, F.X. and Banin, A. 1997, Long-term transformations and redistribution of potentially toxic heavy metals in arid-zone soils incubated: I. Incubation under saturated conditions. *Water Air Soil Pollut.* 95: 399-423.
- Han, F.X., Hu, A.T. and Qin, H.Y. 1995, Transformation and distribution of forms of zinc in acid, neutral and calcareous soils of China. *Geoderma* 66: 121-135.
- Han, F.X., Banin, A. and Triplett, G.B. 2001, Redistribution of heavy metals in arid-zone soils under a wetting-drying soil moisture regime. *Soil Sci.* 166: 18–28.
- Henrichs, T. and Alcamo, J. 2001, Europe's water stress today and in the future. In: Lehner et al. (eds) EuroWasser: Model-based assessment of European water resources and hydrology in the face of global change. Kassel World Water Series 5, Center for Environmental Systems Research, University of Kassel, Kassel, pp 45-54.
- Hussain, I., Raschid, L., Hanjra, M.A., Marikar, F. and van der Hoek, W. 2001, A framework for analyzing socioeconomic, health and environmental impacts of wastewater use in agriculture in developing countries. Working Paper 26, International Water Management Institute, Colombo.
- International Panel on Climate Change (IPCC). 2007, Climate change 2007: the physical science basis. Cambridge University Press, Cambridge.
- Jalali, M. and Khanlari, Z.V. 2008, Effect of aging process on the fractionation of heavy metals in some calcareous soils of Iran. *Geoderma* 143: 26–40.
- Jiménez, B. 2006, Irrigation in developing countries using wastewater. *Int. Rev. Environ. Strat.* 6:229-250
- Jiménez, B., 2008. Water reuse in Latin America and the Caribbean. In: Jiménez, B., Asano, T., (eds) Water Reuse: An International Survey of current practice, issues and needs. IWA, London, pp 177-195.

- Jiménez, B. and Asano, T. 2008a, Water Reuse: An International Survey of current practices, issues and needs. IWA, London.
- Jiménez, B. and Asano, T. 2008b, Water reclamation and reuse around the world. In: Jiménez, B., Asano, T., (eds) Water Reuse: An International Survey of current practice, issues and needs. IWA, London, pp 3-26.
- Joysury, R., Abeeluck, D. and Hauzaree, R. 2012, Wastewater production, treatment, and use in Mauritius. Presented at the Third Regional Workshop of the Project 'Safe Use of Wastewater in Agriculture', 26-28 September 2012, Johannesburg, <http://www.ais.unwater.org/ais/mod/page/view.php?id=61> (Accessed on 21 December, 2012)
- Kamal, A.S.M., Goyer, K., Koottatep, T. and Amin, A.T.M.N. 2008, Domestic wastewater management in South and Southeast Asia: the potential benefits of a decentralized approach. *Urban Water J.* 5: 345-354.
- Kaisi, A., Yasser, M. and Mahrouseh, Y. 2005, Syrian Arab Republic country report. In: Hamdy *et al.* (eds). The use of non-conventional water resources. Options Méditerranéennes, Series A; Mediterranean Seminars No. 66, Proceedings of International Workshop, Alger, IAM Bari Editing Board, pp 251–264.
- Kaur, R., Wani, S.P., Singh, A.K. and Lal, K. 2012, Wastewater production, treatment and use in India. Presented at the Second Regional Workshop of the Project 'Safe Use of Wastewater in Agriculture', 16-18 May 2012, New Delhi, <http://www.ais.unwater.org/ais/mod/page/view.php?id=62> (Accessed on 21 December, 2012).
- Kayizzi, R.K., Tomusange, T.M. and Paskwale, K.A. 2012, Wastewater production, treatment, and use in Uganda. Presented at the Third Regional Workshop of the Project 'Safe Use of Wastewater in Agriculture', 26-28 September 2012, Johannesburg, <http://www.ais.unwater.org/ais/mod/page/view.php?id=61> (Accessed on 21 December, 2012).
- Keraita, B., Drechsel, P., Huibers, F. and Raschid-Sally, L. 2002, Wastewater use in informal irrigation in urban and peri-urban areas of Kumasi, Ghana. *Urban Agric.Mag.* 8: 11-13.
- Kiziloglu, F.M., Turan, M., Sahin, U., Angin, I. and Okuroglu, M. 2007, Effects of wastewater irrigation on soil and cabbage-plant (*Brassica oleracea var. capitata cv. Yalova-1*) chemical properties. *J Plant. Nutr. Soil Sci.* 170: 166-172.
- Kucuksezgin, F., Uluturhan, E., and Batki, H. 2008, Distribution of heavy metals in water, particulate matter and sediments of Gediz River (Eastern Aegean). *Environ. Monit. Assess.* 141: 213-225.
- Lazarova, V. and Bahri, A. 2005, Water reuse for irrigation: Agriculture, landscapes, and Turf Grass. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Lekhoana, L. 2012, Wastewater production, treatment, and use in Lesotho. Presented at the Third

- Regional Workshop of the Project 'Safe Use of Wastewater in Agriculture', 26-28 September 2012, Johannesburg, <http://www.ais.unwater.org/ais/mod/page/view.php?id=61> (Accessed on 21 December, 2012)
- Li, X., Poon, C. and Liu, P.S. 2001, Heavy metal contamination of urban soils and street dust in Hong Kong. *Appl Geochem* 16: 1361-1368.
- Lindsay, W.L. and Norvell, W.A. 1978, Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42: 421-428
- Loeppert, R.H. and Inskeep, W.P. 1996, Iron. In: Method of soil analysis. Part 3. Chemical methods, In: Sparks *et al.* (eds), American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, pp 639-664.
- Lucho-Constantino, C.A., Prieto-García, F., Razo, L.M.D., Rodríguez-Vázquez, R. and Poggi-Valardo, H.M. 2005, Chemical fractionation of boron and heavy metals in soils irrigated with wastewater in central Mexico. *Agr. Ecosyst. Environ.* 108: 57-71.
- Marka, L. 2012, Wastewater production, treatment and use in Bolivia. Presented at the Forth Regional Workshop of the Project 'Safe Use of Wastewater in Agriculture', 11-13 December 2012, Lima, <http://www.ais.unwater.org/ais/mod/page/view.php?id=171> (Accessed on 21 December, 2012; in Spanish)
- Mathers, C.D., Lopez, A.D. and Murray, J.L. 2006, The burden of disease and mortality by condition: Data, methods, and results for 2001. In: Lopez *et al.* (eds), Global burden of disease and risk factors, Oxford University Press, New York, pp.47-95.
- Matsuno, Y., Ensink, J.H.J., van der Hoek, W. and Simons, R.W. 2005, Assessment of the use of wastewater for irrigation: a case in Punjab, Pakistan. *Water and Energy* 15: 49.
- McKenzie, R.M. 1980, The adsorption of lead and other heavy metals on oxides of manganese and iron. *Aust. J. Soil Res.* 18: 61-73.
- McCornick, P.G., Hijazi, A. and Sheikh, B. 2004, From wastewater reuse to water reclamation: progression of water reuse standards in Jordan. In: Scott *et al.* (eds.), Wastewater Use in Irrigated Agriculture, CABI Publishing, UK. pp 153-162.
- Mehra, O.P. and Jackson, M.L. 1960, Iron oxide removal from soils and clays by dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clay Clay Miner* 7: 317-327.
- Ministry for the Environment, New Zealand (MENZ). 2003, Sustainable wastewater management: A handbook for smaller communities. MENZ, Wellington.
- MENZ, 2012. Wastewater. <http://www.mfe.govt.nz/issues/waste/wastewater/index.html> (Accessed on 21 December, 2012)
- Ministry of Environment Protection, the People's Republic of China (MEPPRC). 2010, Report on the state of the environment in China 2010.

- http://english.mep.gov.cn/standards_reports/soe/soe2010/ (Accessed on 21 December, 2012).
- 国土交通省 . 2012, 日本の水資源 <http://www.mlit.go.jp/tochimizushigen/mizsei/hakusyo/index5.html> (Accessed 19 September, 2012).
- Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation (MNRERF). 2009, The status and use on water resources Russian Federation in 2008: state report. http://www.mnr.gov.ru/upload/iblock/7ea/4490_gosdoklad_po_vodn_resursam_za_2008_g..pdf?sptial=Y (Accessed on 21 December, 2012; in Russian)
- Ministry for Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus (MNREPRB). 2002, National Report: Environmental Conditions in the Republic of Belarus. MNREPB, Minsk.
- Möller, A., Müller, H.W., Abdullah, A., Abdelgawad, G. and Utermann, J. 2005, Urban soil pollution in Damascus, Syria: concentrations and patterns of heavy metals in the soils of the Damascus Ghouta. *Geoderma* 124: 63-71
- Moyo, L.G. 2012, Wastewater production, treatment, and use in Namibia. Presented at the Third Regional Workshop of the Project 'Safe Use of Wastewater in Agriculture', 26-28 September 2012, Johannesburg, <http://www.ais.unwater.org/ais/mod/page/view.php?id=61> (Accessed on 21 December, 2012).
- Murtaza, G. 2012, Wastewater production, treatment and use in Pakistan. Presented at the Second Regional Workshop of the Project 'Safe Use of Wastewater in Agriculture', 16-18 May 2012, New Delhi, India <http://www.ais.unwater.org/ais/mod/page/view.php?id=62> (Accessed on 21 December, 2012).
- Murugananthan, M., Bhaskar, R.G. and Prbhakar, S. 2004, Separation of pollutants from tannery effluents by electro flotation. *Sep. Purif. Technol.* 40: 69-75.
- Mutengu, S., Hoko, Z. and Makoni, F.S. 2007, An assessment of the public health hazard potential of wastewater reuse for crop production. A case of Bulawayo city, Zimbabwe. *Phys. Chem. Earth* 32:1195-1203.
- Narwal, R.P. and Singh, B.R. 1998, Effect of organic materials on partitioning, extractability and plant uptake of metals in an Alum Shale soil. *Water Air Soil Pollut.* 103: 405-421.
- Narwal, R.P., Singh, B.R. and Sallbu, B. 1999, Association of cadmium, zinc, copper, and nickel with components in naturally heavy metal-rich soils studied by parallel and sequential extractions. *Commun Soil Sci Plant* 30: 1209-1230.
- National Bureau of Statistics of the Republic of Moldova (NBSRM). 2012, Discharge of sewage, mine and underground drainage waters in natural water reservoirs (2004-2011). <http://www.statistica.md/pageview.php?l=en&idc=324&id=2302> (Accessed on 21 December,

2012).

- National Institute for Water, Portugal (NIWP), 2010. Portuguese acronym for National Inventory on Urban Water Supply and Sewerage Systems. Cited by: *National Institute of Statistic. 2010, Wastewater discharged (m³) by Geographic localization and Existence of treatment.* http://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_indicadores&indOcorrCod=0001879&contexto=bd&selTab=tab2 (Accessed on 21 December, 2012).
- National Institute Statistics, Spain. 2012, Survey on water supply and sewage. <http://www.ine.es/welcoing.htm> (Accessed on 21 December, 2012; in Spanish).
- National Statistical Committee of the Republic of Belarus (NSCRB). 2011, Statistical yearbook 2011. NSCRB, Minsk, Belarus.
- National Statistical Service of the Republic of Armenia (NSSRA). 2012, Statistical yearbook of Armenia 2012, NSSRA, Yerevan.
- Navarrete, P. and Viches, R. 2012, Wastewater production, treatment and use in Chile. Presented at the Forth Regional Workshop of the Project 'Safe Use of Wastewater in Agriculture', 11-13 December 2012, Lima, <http://www.ais.unwater.org/ais/mod/page/view.php?id=171> (Accessed on 21 December, 2012; in Spanish).
- Nelson, D.W. and Sommers, L.E. 1996, Total carbon, organic carbon and organic matter. In: Method of soil analysis. Part 3. Chemical methods, In: Sparks *et al.* (eds), American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, pp 961-1010.
- Nyachhyon, B.L. 2006, Service Enhancement and Development of Sanitary Sewage System in Urban and Semi-Urban Setting in Nepal, Policy Paper 23. Prepared for Economic Policy Network, Ministry of Finance (MOF), HMGN, ADB Nepal Resident Mission. Cited by: *Tuladhar, B., Shrestha, P. and Shrestha, R. 2008, Decentralised wastewater management using constructed wetlands. In: Wicken et al. (eds). 2008, Beyond construction: use by all. A collection of case studies from sanitation and hygiene promotion practitioners in South Asia. – IRC, International Water and Sanitation Centre- WaterAid, Delft and London, pp 86-94.*
- Olsen S.R., Cole, V.C., Watanabe, F.S., and Dean, L.A. 1954, Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. U.S. Department of Agriculture Circular 939. U.S. Department of Agriculture Washington, DC.
- O'Reilly, S.E. and Hochella, M.F. 2003, Lead sorption efficiencies of natural and synthetic Mn and Fe-oxides. *Geochim. Cosmochim. Ac.* 67: 4471-4487.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2006, Improving water management: recent OECD experience, OECD, Paris.
- OECD. 2008, OECD Environmental data: Compendium 2006–2008. <http://www.oecd.org/dataoecd/22/55/41878136.pdf> (Accessed on 21 December, 2012)

- Othman, I., Al-Oudat, M. and Al-Masri, M.S. 1997, Lead levels in roadside soils and vegetation of Damascus city. *Sci. Total Environ.* 207: 43-48.
- Oweis, T., Pala, M. and Ryan, J. 1999, Management alternatives for improved durum wheat production under supplement irrigation in Syria. *Eur. J. Agron.* 11: 255-266.
- Page, A.L., and Chang, A.C. 1985, Fate of wastewater constituents in soil and groundwater: Trace elements. In: *Pettygrove, G.S. and Anano T. (eds) Irrigation with reclaimed municipal wastewater - A guide manual*, Lewis Publishers, Chelsea, MI, pp13.1-13.16.
- Palestinian Economic Council for Development and Reconstruction (PECDR), 2001. Water Sector Strategic Planning, Environmental Authority, Palestine. Cited by: *Fatta, D., Salem, Z., Mountadar, M., Assobhei, O., Loizidou, M., 2004. Urban Wastewater Treatment and Reclamation for Agricultural Irrigation: The situation in Morocco and Palestine. Environ. 24, 227-236.*
- Pérez A.L. and Montás L.A.R. 2012, Wastewater production, treatment and use in Dominican Republic. Presented at the Forth Regional Workshop of the Project 'Safe Use of Wastewater in Agriculture', 11-13 December 2012, Lima, <http://www.ais.unwater.org/ais/mod/page/view.php?id=171> (Accessed on 21 December, 2012; in Spanish)
- Pinamonti, F., Nicolini, G., Dalpiaz, A., Stringari, G. and Zorzi, G. 1999, Compost use in viticulture: effect on heavy metal levels in soil and plants. *Commun. Soil Sci. Plant* 30: 1531-1549.
- Principality of Monaco, Department of Facilities of the Environment and Urban (PMDFEU). 2009, The environment in Principality of Monaco: data collection 2009. <http://www.gouv.mc/content/download/7013/108142/file/L'Environnement%20Recueil%20Donnéés%202009-2.pdf> (Accessed on 21 December, 2012; in French)
- Pimentel, D., Bailey, O., Kim, P., Mullaney, E., Calabrese, J., Walman, L., Nelson, F. and Yao, X. 1999, Will limits of the Earth's resources control human numbers? *Environ. Sustain. Dev.* 1: 19-39.
- Qadir, M. and Oster, J.D. 2004, Crop and irrigation management strategies for saline-sodic soils and waters aimed at environmentally sustainable agriculture. *Sci. Total Environ.* 323: 1-19.
- Qadir, M. and Scott, C.A. 2010, Non-pathogenic trade-offs of wastewater irrigation. In: *Drechsel et al. (eds), Wastewater irrigation and health: assessing and mitigation risk in low-income countries*, Earthscan-IWMI-IDRC, Colombo, Sri Lanka, pp 101-127.
- Qadir, M., Sharma, B.R., Bruggeman, A., Choukr-Allah, R. and Karajeh, F. 2007a, Non-conventional water resources and opportunities for water augmentation to achieve food security in water scarce countries. *Agric. Water Manage.* 87: 2-22.

- Qadir, M., Wichelns, D., Raschid-Sally, L., Minhas, P.S., Drechsel, P., Bahri, A. and McCornick, P. 2007b, Agricultural use of marginal-quality water — opportunities and challenges. In: Molden, D. (ed), *Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*. Earthscan, London, pp. 425-457.
- Qadir, M., Wichelns, D., Raschid-Sally, L., McCornick, P.G., Drechsel, P., Bahri, A. and Minhas, P.S. 2010a. The challenges of wastewater irrigation in developing countries. *Agric. Water Manage.* 97: 561-568.
- Qadir, M., Bahri, A., Sato, T. and Al-Karadsheh, E. 2010b. Wastewater production, treatment, and irrigation in Middle East and North Africa. *Irrig. Drain. Syst.* 24: 37-51.
- Qishlaqi, A., Moore, F. and Forghani, G. 2008, Impact of untreated wastewater irrigation on soils and crops in Shiraz suburban area, SW Iran. *Environ. Monit. Assess.* 141: 257-273.
- Rashid, A. 1997, Soil testing and plant analysis methodology for dryland research. In: Ryan, J. (ed), *Accomplishments and future challenges in dryland soil fertility research in the Mediterranean area*, International Center for Agricultural Research in Dry Areas, Aleppo, 219-230.
- Rattan, R.K., Datta, S.P., Chhonkar, P.K., Suribabu, K. and Singh, A.K. 2005, Long-term impact of irrigation with sewage effluents on heavy metal content in soils, crops and groundwater: a case study. *Agr. Ecosyst. Environ.* 109: 310-322.
- Raschid-Sally, L. and Jayakody, P. 2008, Drivers and Characteristics of Wastewater Agriculture in Developing Countries: Results from a Global Assessment. Research Report 127, International Water Management Institute, Colombo.
- Raschid-Sally, L., Doan D.T. and Abayawardana, S. 2004, National Assessments on Wastewater Use in Agriculture and an Emerging Typology: The Vietnam Case Study. In: Scott *et al.* (eds) *Wastewater Use in Irrigated Agriculture Confronting the Livelihood and Environmental Realities*. CABI- IWMI- IDRC, pp 81-90.
- Republic of Macedonia, State Statistical Office (RMSSO). 2011, Environmental statistics, 2011. RMSSO, Skopje.
- Rijsberman, F.R. 2006, Water scarcity: fact or fiction? *Agric. Water Manage.* 80: 5-22.
- Russan, M.J.M., Hinnawi, S. and Rousan, L. 2007, Long term effect of wastewater irrigation on forage crops on soil and plant quality parameters. *Desalination* 215: 143-152.
- Ryan, J., Estefan, G. and Rashid, A. 2001, Soil and plant analysis laboratory manual. International Center for Agricultural Research in the Dry Areas, Aleppo.
- Ryan J., Masri S., Garabet S., 1996. Geographical distribution of soil test values in Syria and their relationship with crop response . *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 27: 1579-1593.
- Salbu, B., Krekling, T. and Oughton, D.H. 1998, Characterisation on radioactive particles in the environment. *Analyst* 123: 843-849.

- Saloua, R. 2012, National report: Tunisia. Presented at the First Regional Workshop of the Project 'Safe Use of Wastewater in Agriculture', 18-19 February 2012, Marrakech, Morocco <http://www.ais.unwater.org/ais/mod/page/view.php?id=59> (Accessed on 21 December, 2012; in French).
- Sánchez-Martín, M.J., García-Delgado, M., Lorenzo, L.F., Rodríguez-Cruz, M.S. and Arienzo, M. 2007, Heavy metals in sewage sludge amended soils determined by sequential extractions as a function of incubation times of soils. *Geoderma* 142: 262-273.
- Sastre, I., Vicente, M.A. and Lobo, M.C. 2001, Behaviour of cadmium and nickel in a soil amended with sewage sludge. *Land Degrad Dev.* 12: 27-33.
- Scott, C.A., Faruqui, N.I. and Raschid-Sally, L. 2004, Wastewater use in irrigation agriculture: Management challenges in developing countries. In: Scott *et al.* (eds), *Wastewater Use in Irrigated Agriculture Confronting the Livelihood and Environmental Realities*. CABI- IWMI-IDRC, pp 1-10.
- Scott, C.A., Zarazúa, J.A. and Levine, G. 2000, Urban-wastewater reuse for crop production in the water-short Guanajuato, Mexico. Research Report 41. International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka.
- Segal-Rozenhaimer, M., Shavit, U., Vengosh, A., Gavrieli, I., Farber, E., Holtzman, R., Mayer, B. and Shaviv, A. 2004, Sources and transformations of nitrogen compounds along the lower Jordan River. *J. Environ. Qual.* 33: 1440-1451.
- Sheppard, M.I. and Thibault, D.H. 1992, Desorption and extraction of selected heavy metals from soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 415-423.
- Shiklomanov, I.A. and Rodda, J.C. 2003, *World Water Resources at the Beginning of the 21st Century*. International Hydrology Series. Cambridge University Press, Cambridge.
- Shrivastava, P. and Swarup, A. 2000. Management of wastewater for environmental protection of freshwater resources: An approach for tropical countries both developing and undeveloped. In: International Conference on Freshwater, 3-7 December, Bonn. Cited by: Kamal, A.S.M., Goyer, K., Koottatep, T., Amin, A.T.M.N., 2008. *Domestic wastewater management in South and Southeast Asia: the potential benefits of a decentralized approach*. *Urban Water J.* 5, 345-354.
- Shuman, L.M. 1982, Separating soil iron- and manganese-oxide fractions for microelement analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 1099-1102.
- Siebe, C. 1998, Nutrient input to soils and their uptake by alfalfa through long-term irrigation with untreated sewage effluent in Mexico. *Soil Use and Manage.* 14: 119-122.
- Singh, K.P., Malik, A., Sinha, S., Singh, V.K. and Murthy, R.C. 2005, Estimation of source of heavy metal contamination in sediments of Gomti River (India) using principal component

- analysis. *Water Air Soil Pollut.* 166: 321-341.
- Sloan, J.J., Dowdy, R.H., Dolan, M.S. and Linden, D.L. 1997, Long-term effects of biosolids applications on heavy metal bioavailability in agricultural soils. *J. Environ. Qual.* 26: 966-974.
- Solley, W.B., Pirce, R.R. and Perlman, H.A. 1998, Estimated use of water in the United States in 1995. U.S. Geological Survey Circular, 1200. U.S. Geological Survey, Colorado.
- Song, Y., Ji, J., Mao, C., Yang, Z., Yuan, X., Ayoko, G.A. and Frost, R.J. 2010, Heavy metal contamination in suspended solids of Changjiang River: environmental implications. *Geoderma* 159: 286-295.
- Song, Z., Williams, C.J. and Edyvean, R.D.J. 2004, Treatment of tannery wastewater by chemical coagulation. *Desalination* 164: 249-259.
- Souare, M.M., Sambe, L., Mbaye, M. and Balde, D. 2012, National Report: Senegal. Presented at the First Regional Workshop of the Project 'Safe Use of Wastewater in Agriculture', 18-19 February 2012, Marrakech, Morocco <http://www.ais.unwater.org/ais/mod/page/view.php?id=59> (Accessed on 21 December, 2012)
- Statistics Netherlands. 2012, Urban waste water treatment per province and river basin district. <http://statline.cbs.nl/StatWeb/publication/?DM=SLEN&PA=7477ENG&D1=24,42&D2=a,!1-16&D3=l&LA=EN&VW=T> (Accessed on 21 December, 2012).
- Statistical Office of Montenegro (MONSTAT). 2010, Statistical Year Book 2010. MONSTAT, Podgorica, Montenegro.
- Statistical Office of the Republic of Serbia (SORS). 2012, Statistical Year Book 2012. SORS, Belgrade, Serbia.
- Statistical Office of the Republic of Slovenia (SORSi). 2012, Environment, energy, and transport in figures. <http://www.stat.si/doc/pub/OET-ANG.pdf> (Accessed on 21 December, 2012).
- Stolberg, F., Borysova, O., Mitrofanov, I., Barannik, V. and Egtesadi, P. 2006, Global international water assessment: Caspian Sea, GIWA Regional assessment 23. http://www.unep.org/dewa/giwa/areas/reports/r23/giwa_regional_assessment_23.pdf (Accessed on 21 December, 2012).
- State Water Resources Control Board (SWRCB), California. 2009, Recycled Water Policy. http://www.swrcb.ca.gov/water_issues/programs/water_recycling_policy (Accessed on 21 December, 2012).
- Syrian Arab Standards and Metrology Organization (SASMO). 2002, SASMO 2752: Standard for wastewater reuse for agriculture. Syrian Arab Standards and Metrology Organization, Damascus.
- Tajrishy, M. 2012, Wastewater production, treatment and use in Iran. Presented at the Second Regional Workshop of the Project 'Safe Use of Wastewater in Agriculture', 16-18 May 2012,

- New Delhi, India, <http://www.ais.unwater.org/ais/mod/page/view.php?id=62> (Accessed on 21 December, 2012).
- Tessier, A., Campell, P.G.C. and Bisson, M. 1979, Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Anal. Chem.* 51: 844-855.
- The State Committee of Statistics of Ukraine (SCSU). 2012, Main indicators on the water resources use and protection. <http://www.ukrstat.gov.ua/> (Accessed on 21 December, 2012).
- Tomlinson, D.L., Wilson, J.G., Harris, C.R. and Jeffrey, D.W. 1980, Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgoland Mar. Res.* 33: 566-575.
- Tong, B.C. 2012, Wastewater production, treatment and use in Peru. Presented at the Forth Regional Workshop of the Project 'Safe Use of Wastewater in Agriculture', 11–13 December 2012, Lima. <http://www.ais.unwater.org/ais/mod/page/view.php?id=171> (Accessed on 21 December, 2012; in Spanish).
- Torrent, J. and Barrón, V. 2003, Iron oxides in relation to the colour of mediterranean soils. In: Pérez-Rodriguez, J.L. (ed) Applied study of cultural heritage and clays. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, pp 377-386
- Trenberth, K.E., Dai, A., Rasmussen, R.M. and Parsons, D.B. 2003, The changing character of precipitation. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 84:1205-1217.
- TURKSTAT. 2012, Environment statistics; Municipal Wastewater Statics. <http://www.turkstat.gov.tr/Start.do;jsessionid=hkLSRRjHdxhhKXPhMZLTwYG0w6SRJ5HLT2bGZdlpB0L0khfYB9tY!-1381182142> (Accessed on 21 December, 2012).
- Ulimat, A.A. 2012, Wastewater production, treatment and use in Jordan. Presented at the Second Regional Workshop of the Project 'Safe Use of Wastewater in Agriculture', 16-18 May 2012, New Delhi, India, <http://www.ais.unwater.org/ais/mod/page/view.php?id=62> (Accessed on 21 December, 2012).
- United Nations (UN). 2000. Wastewater management policies and practices in Asia and the Pacific. Water Resources Series No 79, UNESCAP, Bangkok.
- UN. 2012, Population connected to wastewater collecting system. <http://unstats.un.org/unsd/environment/wastewater.htm> (Accessed on 21 December, 2012).
- UN Department of Economic and Social Affairs, Division for Sustainable Development (UNDESA-DSD). 2004, Sanitation Country Profile: Russian Federation. <http://www.un.org/esa/agenda21/natlinfo/countr/russia/RussiaSanitation04f.pdf> (Accessed on 21 December, 2012).
- UNDESA, Population Division (UNDESA-PD). 2013, Online data: Urban and rural population. http://esa.un.org/unpd/wup/unup/index_panel1.html (Accessed on 9 October, 2013).

- UN Economic Commission for Europe (UNECE). 2001, Environmental Performance reviews: Uzbekistan. UN Publication, New York and Geneva.
- UNECE. 2003, Environmental Performance reviews: Georgia. UN Publication, New York and Geneva.
- UNECE. 2004, Environmental Performance reviews: Tajikistan. UN Publication, New York and Geneva.
- UNECE. 2005, Environmental Performance reviews: Republic of Moldova Second review. UN Publication, New York and Geneva.
- UNECE. 2007, Environmental Performance reviews: Republic of Serbia Second review. UN Publication, New York and Geneva.
- UNECE. 2009, Environmental Performance reviews: Kyrgyzstan Second review. UN Publication, New York and Geneva.
- UN Educational, Scientific and Cultural Organization, World Water Assessment Programme (UNESCO-WWAP). 2003, The United Nations World Water Development Report 1: Water for People, Water for Life. UNESCO, Paris.
- UN Environmental Programme (UNEP), Global Programme of Action for the Protection of the Marine Environment from and land-based Activities (GPA). 2004, Water supply & sanitation coverage in UNEP regional seas; Need for regional wastewater emission targets! Section III: An inventory of regional specific data and the feasibility of developing regional Wastewater Emission Targets (WET), UNEP/GPA, Hague.
- UNEP, Mediterranean Action Plan (MAP), Blue Plan Regional Activity Center (BPRAC). 2005, Dossier on tourism and sustainable development in the Mediterranean. MAP technical reports series number 159, UNEP-MAP, Athens.
- UN development programme (UNDP). 2012, Human development reports. <http://hdr.undp.org/en/> (Accessed on 13 December, 2012).
- UN Interim Administration Mission in Kosovo (UNMIK). 2003, Kosovo: State of the Environment Report. http://enrin.grida.no/htmls/kosovo/Kosovo_SOE_part1.pdf (Accessed on 21 December, 2012).
- United State Salinity Laboratory Staff. (U.S. Salinity Lab. Staff). 1954, Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. U.S. Department of Agriculture Handbook No.60 Washington, DC: U.S. Government Printer.
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). 2004, Guidelines for Water Reuse. EPA/625/R-04/108, USEPA, Washington, DC.
- USEPA. 2012, 2012 Guidelines for Water Reuse. EPA/600/R-12/618, USEPA, Cincinnati, OH: National Risk Management Research Laboratory; Washington, DC.

- van der Hoek, W. 2004, A Framework for a Global Assessment of the Extent of Wastewater Irrigation: The Need for a Common Wastewater Typology. In: Scott *et al.* (eds) Wastewater Use in Irrigated Agriculture Confronting the Livelihood and Environmental Realities. CABI-IWMI- IDRC, pp11-24.
- van Rooijen, D.J., Biggs, T.W., Smout, I. and Drechsel, P. 2010, Urban growth, wastewater production and use in irrigated agriculture: a comparative study of Accra, Addis Ababa and Hyderabad. *Irrig. Drainage Syst.* 24: 53-64.
- Vassolo, S. and Döll, P. 2005, Global-scale gridded estimates of thermoelectric power and manufacturing water use. *Water Resources Research* 41 (4), W04010, <http://dx.doi.org/10.1029/2004WR003360> (Accessed on 13 January, 2013).
- Vodyanitskii, Y.N. 2010, The role of iron in the fixation of heavy metals and metalloids in soils: a review of publications. *Eurasian Soil Sci.* 43: 519-532.
- Water Environment Partnership in Asia (WEPA), Institute for Global Environmental Strategies Ministry of the Environment, Japan (IGES). 2012, WEPA Outlook on water environmental management in Asia 2012. <http://www.wepa-db.net/pdf/1203outlook/01.pdf> (Accessed on 21 December, 2012).
- Westcot, D.W. 1997, Quality control of wastewater for irrigated crop production. Water reports 10, FAO, Rome.
- Wilcke, W., Müller, S., Kanchanakool, N. and Zech, W. 1998, Urban soil contamination in Bangkok: heavy metal and aluminium partitioning in topsoils. *Geoderma* 86: 211-228.
- World Bank (WB). 1999, Ukraine: Restoring Growth with Equity: A Participatory Country Economic Memorandum. WB, Washington DC.
- WB. 2012a, The World Bank data; GNI per capita, Atlas method (current US\$). <http://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.CD> (Accessed on 21 December, 2012)
- WB. 2012b, Urban development. <http://web.worldbank.org/WBSITE/EXTERNAL/COUNTRIES/MENAEXT/0,,contentMDK:20535619~pagePK:146736~piPK:226340~theSitePK:256299,00.html>. (Accessed on 30 May, 2012).
- WB. 2013, Organic water pollutant (BOD) emissions (kg per day). <http://data.worldbank.org/indicator/EE.BOD.TOTL.KG> (Accessed on 13 January, 2013).
- WHO. 2006, Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and grey water: wastewater use in agriculture. Vol. 2. Geneva: WHO.
- WHO. 2007, Diarrhea: Why children are still dying and what can be done. WHO, Geneva.
- WHO. 2008, The global burden of disease: 2004 update. WHO, Geneva.
- WHO. 2013, WHO statistic information systems. <http://apps.who.int/whosis/data/> (Accessed on 13

January, 2013).

WHO, United Nations Children's Fund (UNICEF). 2012, Joint Monitoring Programme (JMP) for water supply and sanitation. <http://www.wssinfo.org/data-estimates/table/> (Accessed on 21 December, 2012).

Xu, Y., Boonfueng, T., Axe, L., Maeng, S. and Tyson, T. 2006, Surface complexation of Pb (II) on amorphous iron oxide and manganese oxide: spectroscopic and time studies. *J. Coll. Sci. Imp. U. Tok.* 299: 28-40.

Zachara, J.M., Cowan, C.E. and Resch, C.T. 1991, Sorption of divalent metals on calcite. *Geochim. Cosmochim. Ac.* 55: 1549-1562.

Zulita, A. 2003, Syria country paper. In: Proceedings of the expert consultation for launching the regional network on wastewater re-use in the Near East, 107–115. TC/D/Y5186E/12.03/100. Cairo: Regional Office for the Near East, FAO and Regional Office for the Eastern Mediterranean, WHO.

付表

付表1. 主要国などにおける都市下水処理場に流入水および流出水の水質

付表2. シリア国アレッポ近郊地域・調査地域の水質

付表3. シリア国アレッポ近郊地域・都市下水灌漑農地の理化学的性質

付表4. シリア国アレッポ近郊地域・都市下水灌漑農地の表層土の重金属特性

付表5. シリア国アレッポ近郊地域・地下水灌漑農地の表層土の理化学特性

付表6. シリア国アレッポ近郊地域・都市下水灌漑農地の植物体の理化学性

付表 1 主要国などにおける都市下水処理場に流入水および流出水の水質

国名	地域 ^a	報告年	BOD ₅ mg L ⁻¹	COD mg L ⁻¹	TSS mg L ⁻¹	Total N mg L ⁻¹	Total P mg L ⁻¹	引用文献
低所得国 流入水								
マラウエイ国	SSA	2005-2006	625.2		154.1			Chipofya et al., 2010
低所得国 流出水								
ケニア国	SSA	1972	448		550			UNEP-ITEC, 2002
マラウエイ国	SSA	2005-2006	105.8		99.6			Chipofya et al., 2010
ジンバブエ国	SSA	2006				36	7.2	Mutengu et al., 2007
下位中所得国 流入水								
エジプト国	MENA		496	1248	439.5			Bahri 1998
ガーナ国	SSA	2007	63.79	236.99	92.39			Ansah et al., 2011
インド国	Asia			365.65	651.05	56.3		Singh et al., 2004
モロッコ国	MENA		353	928	397			Bourziza et al., 2000
パキスタン国	Asia	2000				78.3	8.6	Ensink et al., 2002
パレスチナ自治政府	MENA		605	1360	576			Salem 2002
フィリピン国	Asia	1998, 2000	570					WB 2003
スーダン国	SSA	2000	226	573	294			Hasan and Hussein 2001
ウクライナ国	CIS		180					DEPA and DANCEE, 2003

付表 1 続き

国名	地域	報告年	BOD ₅ mg L ⁻¹	COD mg L ⁻¹	TSS mg L ⁻¹	Total N mg L ⁻¹	Total P mg L ⁻¹	引用文献
下位中所得国 流出水								
エジプト国	MENA		272.8	951.7	222.5			Bahri 1998
ガーナ国	SSA	2007	16.45	136.23	52			Ansah et al., 2011
インド国	Asia			118.4		35.6		Singh et al., 2004
モロッコ国	MENA		9	75	3.9	10		USEPA 2004
パレスチナ自治政府	MENA		40	102	38			Salem 2002
スーダン国	SSA	2000	45	137	51.4			Hasan and Hussein 2001
ザンビア国	SSA	1972	940		662			UNEP-ITEC, 2002
上位中所得国 流入水								
ブラジル国	LA		516	1088	404	69	9	von Sperling and Oliveria 2007
コロンビア国	LA		275	411	162			Sarria et al., 2010
ハンガリー国	Euro		377					Pons et al., 2004
メキシコ国	LA	2008	670					NWCM, 2010
チェニジア国	MENA		366	841	353			Bahri, 1998
トルコ国	MENA	2003-2004	204.27	446.59	221.14	35.35	8.3	Gunduz et al., 2006
上位中所得国 流出水								
ブラジル国	LA		127	424	166	42	5	von Sperling and Oliveria 2007
ヨルダン国	MENA		20.94	190.13	81.07	67.7		WAJ, 2011

付表 1 続き

国名	地域	報告年	BOD ₅ mg L ⁻¹	COD mg L ⁻¹	TSS mg L ⁻¹	Total N mg L ⁻¹	Total P mg L ⁻¹	引用文献
上位中所得国 流出水 (続き)								
チェニジア国	MENA		29.8	154.4	28			Bahri, 1998
トルコ国	MENA	2003-2004	16.94	63.23	36.38	9.22	5.48	Gunduz et al., 2006
高所得国 流入水								
オーストリア国	Euro		285	526		44	7.1	Pons et al., 2004
ベルギー国	Euro	1997	187	477	236			Pons et al., 2004
ベルギー国	Euro	2003	278	650	286	56.7	9.7	Aquarec, 2002
カナダ国	NA	2001	165.07		192.19			CWWA, 2001
キプロス国	MENA		547	522	436	98	16	Pons et al., 2004
チェコ国	Euro	2012	242	540	264			CSO, 2013
デンマーク国	Euro		163	455		36	7.8	Pons et al., 2004
フィンランド国	Euro		266	559	378	43.8	7.47	Ødegaard, 1999
フランス国	Euro	1998	268	634	302	52	9.3	Pons et al., 2004
ドイツ国	Euro		319	548	208	59	8	Pons et al., 2004
日本	Asia	2011, 2012	150	86.3	123	26.67	3.17	東京下水道局, 2013; 大阪市, 2013, 横浜市, 2013
クウェイト国	MENA	2005		391	251.75		24.25	Al-Anzi et al., 2011
モナコ国	Euro	1995-2007	233.6	524	269.4			PMDFEU, 2009
オランダ国	Euro	2012	198	503		46.58	7.22	Statistics Netherlands, 2013

付表 1 続き

国名	地域	報告年	BOD ₅ mg L ⁻¹	COD mg L ⁻¹	TSS mg L ⁻¹	Total N mg L ⁻¹	Total P mg L ⁻¹	引用文献
高所得国 流入水 (続き)								
ノルウェー国	Euro		113	233	143	22	3.00	Ødegaard, 1999
ロシア国	CIS	1997-1998	98.35	350	280	28.7	5.4	Kransnoborodko et al., 1999
ロシア国	CIS	1998	124			24.5	4.3	UNEP-ITEC, 2002
サウジアラビア国	MENA		109.65	354.25	170.6		15.55	Al-Sa'ati, 1994; Al-Mussaid, 1995
スロベニア国	Euro		267	581	426	37	5.5	Pons et al., 2004
スペイン国	Euro	2009	281.4	586.8	307.7	40.2	6.5	Statistic Institute, Spain, 2013
スウェーデン国	Euro		171	477	243	33.1	6.14	Ødegaard, 1999
スイス国	Euro		133	239	98	28	4	Pons et al., 2004
イギリス国 (英国)	Euro		212	613	150	40		Pons et al., 2004
高所得国 流出水								
ベルギー国	Euro	2003	0.5	33.8	6.6	10.4	1.3	Aquarec, 2002
カナダ国	NA	2001	17.58		29.94	10.19		CWWA, 2001
チェコ国	Euro	2012	4.6	29	6.6			CSO, 2013
イタリア国	Euro	1999-2003	34.3		90.3			Capra and Scicolone, 2007
日本	Asia	2011, 2012	4.7	8.83	3	9.8	0.8	東京下水道局, 2013; 大阪市, 2013, 横浜市, 2013

付表 1 続き

国名	地域	報告年	BOD ₅ mg L ⁻¹	COD mg L ⁻¹	TSS mg L ⁻¹	Total N mg L ⁻¹	Total P mg L ⁻¹	引用文献
高所得国 流出水								
モナコ国	Euro	1995-2007	49.8	140.2	49.5			PMDFEU, 2009
オランダ国	Euro	2012	4	38		7.95	1.11	Statistics Netherlands, 2013
ロシア国	CIS	1998	5			21	3.3	UNEP-ITEC, 2002
サウジアラビア国	MENA		1.9	142.6	13		12.05	Al-Sa'ati, 1994; Al-Mussaid, 1995
スペイン国	Euro	2009	21.5	67.3	24.1	15.5	1.9	Statistic Institute, Spain, 2013

^a 地域区分は 2.2.2.1 に準ずる。地域は、北アメリカ (NA) , ラテンアメリカ (LA) , ヨーロッパ (Euro) , 旧ソビエト連邦諸国 (CIS) , 中東および北アフリカ (MENA) , サブサハラアフリカ (SSA) , オセアニア (Oce) , およびアジア (Asia)

付表 1 の引用文献

- Al-Anzi, B., Abusam, A., Shahalam, A. 2011. Wastewater reuse in Kuwait and its impact on amount of pollutants discharge in to the sea. *Environ. Anal. Toxicol.* S3:003
- Al-Mussaid M. 1995. Wastewater treatment and reuse in Saudi Arabia. Country presentation in a regional training course, Center for Environmental Health Activities, World Health Organization, Amman, Cited in: *WHO-Regional Office for the Eastern Mediterranean Regional Centre for Environmental Health Activities (WHO-ROEMRCEHA)* , 2005. *A regional overview of wastewater management and reuse in the Eastern Mediterranean Region. WHO-ROEMRCEHA, Cairo.*
- Al-Sa'ati A. 1994. Planning for water reuse in Saudi Arabia. Presentation in a workshop: utilization of treated wastewater in agricultural projects. College for Science and Technology, Ajman University by UNICEF/WHO, Cited in: *WHO-Regional Office for the Eastern Mediterranean Regional Centre for Environmental Health Activities (WHO-ROEMRCEHA)*, 2005. *A regional overview of wastewater management and reuse in the Eastern Mediterranean Region. WHO-ROEMRCEHA, Cairo.*
- Ansah, M., Awuah, E., Oduro-Kwarteng, S., Ackerson, N.O.B. 2011. The use of natural system for the treatment of greywater: A case study of Kpeshie Lagoon, Accra, Ghana. *Int. J. water resour. Environ. En.* 3: 238-250.
- Bahri, A. 1998. Wastewater reclamation and reuse in Tunisia, In: *Wastewater Reclamation and Reuse, Water Quality Management Library, Vol. 10*, ed. T. Asano, Technomic Publishing Co., Inc., 877-916.
- Bourziza, M., Karim, F., Yagoubi, A., Foutlane, A and Echihabi, L. 2000. Wastewater typology in Morocco – features and specificity, Proc.1st IWA World Congress, Paris. Cited in: *Pons M N, Spanjers, H, Baetens D, Nowal O, Gillot S, Nouwen J, Schuttinga N. 2004. Wastewater Characteristics in Europe- A survey. European Water Management Online*
- 東京下水道局, 2013, 数字で見る東京の下水道—平成 23 年度の下水処理状況.
<http://www.gesui.metro.tokyo.jp/gijyutou/fukyu/m11nendata/23ryun0.htm> Accessed 3 November, 2013.
- Canadian Water and Wastewater Association (CWWA), 2001. National Survey of Wastewater treatment Plants.
- Chipofya, V, Kraslawski, A., Avramenko, Y. 2010. Comparison of pollutant levels in effluent from wastewater treatment plants in Blantyre, Malawi. *Int. J. Water Resour. Environ. En.* 2: 80-87
- Czech Statistical Office (CSO), 2013. Water Supply, Sewerage and Watercourses in 2012.
http://www.czso.cz/csu/2013edicniplan.nsf/engpubl/2003-13-eng_r_2013 Accessed 2

November, 2012.

- El Hasan B, Hussein I. 2001. Wastewater management and reuse in Sudan. Country profile report presented to the Center for Environmental Health Activities, World Health Organization, Amman, 2001, Cited in: *WHO-Regional Office for the Eastern Mediterranean Regional Centre for Environmental Health Activities (WHO-ROEMRCEHA), 2005. A regional overview of wastewater management and reuse in the Eastern Mediterranean Region. WHO-ROEMRCEHA, Cairo.*
- Ensink J.H.J., van der Hoek W., Simmons R.W. 2008. Livelihood from wastewater: water reuse in Faisalabad, Pakistan. IWMI, Colombo, Sri Lank.
- Gunduz O., Turkman, A., Doganlar, D.U. 2006. Alternative formulations for the reuse of treated wastewater in Menemen plain irrigations scheme. In P. Hlavinek et al., (eds) *Integrated Urban Water Resources Management* pp.281-290
- Mapanda, F., Mangwayana, E.N., Nyamangara, J., Giller, K.E., 2005. The effect of long-term irrigation using wastewater on heavy metal contents of soils under vegetables in Harare, Zimbabwe. *Agr. Ecosys. Environ.* 107: 151–165
- Madyiwa, S., Chimbari, M., Nyamangara, J., Bangira, C., 2002. Cumulative effects of sewage sludge and effluent mixture application on soil properties of a sandy soil under a mixture of star and kikuyu grasses in Zimbabwe. *Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C* 27:741-753
- Mutengu, S., Hoko, Z., Makoni, FS. 2007. An assessment of the public health hazard potential of wastewater reuse for crop production. A case of Bulawayo city, Zimbabwe. *Phys.Chem. Earth* 32:1195-1203
- National Water Commission of Mexico (NWCM), 2010. Statistics on water in Mexico, 2010 edition. NWCM, Mexico.
- Ødegaard, H. 1999. The influence of wastewater characteristics on choice of wastewater treatment plant, Proc. Nordic Conf. Nitrogen removal and biological phosphate removal, Oslo
- 大阪市, 2013. 下水処理場流入水・放流水の平均水質 .
<http://www.city.osaka.lg.jp/kensetsu/page/0000009568.html> Accessed 3 November, 2013.
- Pons M N, Spanjers, H, Baetens D, Nowal O, Gillot S, Nouwen J, Schuttinga N. 2004. Wastewater Characteristics in Europe- A survey. European Water Management Online
- Principality of Monaco, Department of Facilities of the Environment and Urban (PMDFEU), 2009. The environment in Principality of Monaco: data collection 2009.
<http://www.gouv.mc/content/download/7013/108142/file/L'Environnement%20Recueil%20Donnees%202009-2.pdf> (accessed 21 December, 2012; in French).
- Salem Z. 2002. Wastewater management in Palestine. Presented at an international conference: Wastewater management and its effect on the environment in hot and arid countries, Cited in:

- WHO-Regional Office for the Eastern Mediterranean Regional Centre for Environmental Health Activities (WHO-ROEMRCEHA), 2005. A regional overview of wastewater management and reuse in the Eastern Mediterranean Region. WHO-ROEMRCEHA, Cairo.*
- Sarria, N.V., Victoria, J.R., Lozada, P.T., Parra, C.M. 2010. Performance of a contact stabilization process for domestic wastewater treatment of Cali, Colombia. *Dyna* 78: 98-107
- UNEP-International Environmental Technology Centre (UNEP-ITEC), 2002. Environmentally Sound Technology for Wastewater and Stormwater Management: An International Source Book. IWA Publishing.
- United State Environmental Protection Agency (USEPA), 2004. Guidelines for Water Reuse. EPA/625/R-04/108, USEPA, Washington, DC.
- von Sperling M., Oliveira S.C., 2007. Challenges in the implementation and operation of secondary wastewater treatment. Seminar on "Integrated management of domestic wastewater." Block 2. New development and new technology, Cali, Colombia, 13 and 14 November, 2007
- World Bank, 2003. Philippines environment monitor 2003. http://www-wds.worldbank.org/servlet/WDSContentServer/WDSP/IB/2004/05/24/000012009_20040524135608/Rendered/PDF/282970PH0Environment0monitor.pdf Accessed 8 November, 2013.
- 横浜市, 2013. 全水再生センター水質試験結果. <http://www.city.yokohama.lg.jp/kankyo/data/gesui/nenpou/> Accessed 3 November, 2013.

付表 2 の続き

採取日	下水処理場 からの距離 km	EC dS m ⁻¹	pH	SAR (mmole L ⁻¹) ^{1/2}	陽イオン					陰イオン					TS mg L ⁻¹	SS mg L ⁻¹	TDS	全			全				
					Na	K	Ca	Mg	Total	Cl	SO ₄	HCO ₃	CO ₃	Total				N(Kjeldr)	NH ₄ -N	NO ₃ -N	P	PO ₄ -P			
1	2009.07.28	0.19	1.17	7.57	3.83	5.60	0.21	2.74	1.55	10.10	3.77	0.57	5.76	0.00	10.10	853	90	763	32.8	28.31	1.68	6.4	0.3		
2	2009.07.28	0.60	1.18	7.80	3.92	5.60	0.21	2.54	1.55	9.91	3.75	0.51	5.64	0.00	9.91	830	89	741	32.9	24.60	0.49	5.9	0.3		
3	2009.07.28	2.05	1.11	7.77	3.50	5.14	0.20	2.78	1.54	9.65	3.15	0.95	5.55	0.00	9.65	680	36	644	38.5	27.10	0.44	5.0	0.3		
4	2009.07.28	2.44	1.14	7.81	3.97	5.84	0.21	2.75	1.59	10.39	3.57	1.22	5.61	0.00	10.39	757	50	706	46.3	24.10	0.35	6.3	0.3		
5	2009.07.28	3.72	1.11	7.77	3.57	5.37	0.20	2.84	1.68	10.08	3.25	1.29	5.54	0.00	10.08	720	90	630	30.6	27.03	0.46	6.3	0.3		
6	2009.07.28	3.94	1.07	7.70	3.15	4.70	0.20	2.75	1.69	9.33	2.92	0.82	5.59	0.00	9.33	727	22	705	25.9	26.60	0.46	6.4	0.3		
7	2009.07.29	26.41	1.12	7.57	3.39	5.14	0.20	2.95	1.66	9.95	3.57	0.45	5.93	0.00	9.95	883	64	819	22.5	20.95	5.47	6.1	0.9		
8	2009.07.29	26.55	1.12	7.53	3.43	5.37	0.20	2.94	1.96	10.46	3.75	0.76	5.76	0.19	10.46	960	103	857	22.9	24.60	1.22	5.9	0.9		
9	2009.07.29	26.82	1.12	7.52	3.43	5.37	0.21	3.06	1.85	10.49	3.54	0.98	5.59	0.37	10.49	913	118	795	29.3	25.53	1.29	6.0	1.1		
10	2009.07.29	27.15	1.13	7.53	3.32	5.37	0.21	2.98	2.24	10.80	3.77	1.19	5.84	0.00	10.80	917	73	844	27.3	25.03	1.50	6.3	1.3		
11	2009.07.29	27.70	1.16	7.52	3.57	5.60	0.21	2.82	2.10	10.73	3.75	1.14	5.84	0.00	10.73	907	108	799	28.7	25.74	1.24	6.2	1.1		
12	2009.07.29	27.92	1.16	7.54	3.78	5.84	0.21	3.04	1.74	10.83	3.94	1.04	5.85	0.00	10.83	917	115	802	28.7	26.67	0.97	6.2	1.5		
13	2009.07.30	32.30	1.18	7.70	3.62	5.84	0.20	3.12	2.10	11.26	3.81	1.56	5.25	0.83	11.26	1177	317	859	30.1	23.88	0.99	6.5	0.5		
14	2009.07.30	32.84	1.23	7.73	3.77	6.08	0.20	3.36	1.85	11.49	4.17	1.47	5.48	0.37	11.49	1333	334	1000	27.6	23.52	1.61	6.5	0.8		
15	2009.07.30	33.64	1.19	7.75	3.54	5.60	0.20	3.04	1.97	10.81	3.75	1.02	5.83	0.20	10.81	1373	518	856	30.8	24.95	0.77	7.9	0.6		
16	2009.07.30	34.16	1.19	7.76	3.46	5.60	0.21	3.04	2.20	11.05	3.61	1.43	6.01	0.00	11.05	1020	163	857	26.1	21.74	4.19	6.4	0.8		
17	2009.07.30	34.40	1.18	7.72	3.34	5.60	0.21	2.94	2.68	11.44	3.61	1.73	6.10	0.00	11.44	943	63	880	24.7	24.02	2.19	5.8	0.9		
18	2009.07.30	34.60	1.21	7.68	3.73	6.08	0.21	3.23	2.08	11.62	3.94	1.51	6.07	0.09	11.62	837	6	831	24.9	21.88	2.34	6.0	1.1		
1	2009.08.26	0.19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	2009.08.26	0.60	1.05	7.60	3.82	5.46	0.16	2.30	1.79	9.70	3.12	1.71	4.87	0.00	9.70	823	22	801	29.07	17.57	0.43	4.9	0.2		
3	2009.08.26	2.05	1.15	7.83	4.76	6.72	0.17	2.50	1.49	10.87	3.69	1.73	5.45	0.00	10.87	893	109	784	56.44	22.15	0.31	5.6	0.2		
4	2009.08.26	2.44	1.16	7.77	4.65	6.50	0.17	2.51	1.40	10.58	3.69	1.58	5.30	0.00	10.58	897	64	833	47.89	20.84	0.26	5.6	0.2		
5	2009.08.26	3.72	1.09	7.66	4.32	6.07	0.18	2.42	1.53	10.20	3.54	1.07	5.06	0.53	10.20	660	61	599	37.20	18.43	0.37	5.9	0.3		
6	2009.08.26	3.94	1.09	7.63	4.17	5.87	0.18	2.53	1.44	10.01	3.52	1.09	5.40	0.00	10.01	807	23	784	33.49	18.29	0.27	5.8	0.3		
7	2009.08.27	26.41	1.13	7.59	4.39	6.29	0.20	2.63	1.47	10.59	3.69	0.94	5.38	0.58	10.59	877	45	832	35.63	23.66	0.38	7.5	0.8		
8	2009.08.27	26.55	1.15	7.58	4.53	6.50	0.20	2.68	1.45	10.82	3.63	1.06	5.18	0.95	10.82	953	137	816	43.18	23.60	0.39	7.6	0.8		
9	2009.08.27	26.82	1.20	7.52	4.31	6.07	0.18	2.53	1.44	10.22	3.79	0.00	5.65	0.91	10.35	900	195	706	35.77	21.41	0.42	7.2	0.8		
10	2009.08.27	27.15	1.19	7.57	4.48	6.50	0.20	2.72	1.49	10.90	3.91	0.65	5.46	0.89	10.90	893	123	771	36.06	20.96	0.37	7.3	0.8		
11	2009.08.27	27.70	1.12	7.53	4.19	6.50	0.20	3.12	1.68	11.50	3.73	0.95	5.78	1.04	11.50	773	144	629	27.79	23.04	1.04	7.6	0.8		
12	2009.08.27	27.92	1.19	7.47	4.64	6.72	0.20	2.71	1.49	11.11	3.71	0.90	5.66	0.84	11.11	953	122	831	34.35	25.03	0.46	7.6	0.9		
13	2009.08.27	32.30	1.23	7.52	4.24	6.50	0.20	3.02	1.69	11.40	3.79	2.04	5.10	0.47	11.40	933	28	905	48.03	23.64	5.66	6.7	0.8		
14	2009.08.27	32.84	1.24	7.49	4.29	6.50	0.20	3.03	1.56	11.28	3.91	2.25	4.86	0.27	11.28	883	11	872	28.36	23.82	0.73	6.6	0.8		
15	2009.08.27	33.64	1.18	7.57	4.20	6.50	0.20	3.03	1.76	11.48	3.89	1.22	5.85	0.53	11.48	717	1	715	29.50	23.65	0.29	6.8	0.9		
16	2009.08.27	34.16	1.20	7.53	4.18	6.50	0.20	2.99	1.86	11.54	3.89	1.29	5.68	0.69	11.54	787	5	781	28.79	22.81	1.38	6.4	0.7		
17	2009.08.27	34.40	1.19	7.57	4.09	6.29	0.20	3.02	1.72	11.22	3.73	0.93	5.43	1.13	11.22	693	19	674	31.07	23.17	0.71	6.3	0.8		
18	2009.08.30	34.60	1.11	7.53	4.54	6.50	0.20	2.61	1.48	10.79	3.50	1.01	5.27	1.02	10.79	787	61	725	29.64	22.30	0.39	7.2	0.8		

付表3 シリア国アレッポ近郊地域・都市下水灌漑農地の理化学的性質

Up-1																								
深さ cm	ECe dS m ⁻¹	pHe	SAR (mmole L ⁻¹) ^{1/2}	Na	K	飽和抽出										粒径組成								
						Ca mmole L ⁻¹	Mg	Total	Cl	SO ₄	HCO ₃ ⁻ mmole L ⁻¹	CO ₃	Total	CEC cmole kg ⁻¹	有機物含量 %	全N mg kg ⁻¹	Olsen-P mg kg ⁻¹	CaCO ₃ 当量 %	粘土	シルト %	砂	礫含量 %	土性区分 USDS	
0-10	0.93	8.0	3.02	4.87	0.07	3.89	1.30	10.13	6.70	16.82	2.65	0.00	26.17	37.8	1.14	736	27.8	45	51.2	22.6	26.2	19.3	C	
10-20	1.05	8.0	3.16	5.76	0.15	4.53	2.10	12.54	6.87	17.05	2.70	0.00	26.62	-	1.21	802	33.9	46	50.3	21.0	28.7	12.2	C	
20-50	1.07	8.1	3.83	6.40	0.05	3.79	1.80	12.04	7.58	18.25	2.10	0.00	27.93	-	1.01	834	32.4	43	56.6	18.7	24.6	12.2	C	
50-80	1.27	8.2	4.64	7.77	0.02	4.00	1.60	13.39	8.55	13.16	1.70	0.00	23.41	-	0.76	528	23.4	45	61.4	20.3	18.3	2.3	C	
Up-2																								
深さ cm	ECe dS m ⁻¹	pHe	SAR (mmole L ⁻¹) ^{1/2}	Na	K	飽和抽出										粒径組成								
						Ca mmole L ⁻¹	Mg	Total	Cl	SO ₄	HCO ₃ ⁻ mmole L ⁻¹	CO ₃	Total	CEC cmole kg ⁻¹	有機物含量 %	全N mg kg ⁻¹	Olsen-P mg kg ⁻¹	CaCO ₃ 当量 %	粘土	シルト %	砂	礫含量 %	土性区分 USDS	
0-10	1.27	8.0	2.81	5.76	0.37	6.11	2.30	14.54	5.99	11.27	2.80	0.00	20.06	39.2	3.16	2069	106.6	42	54.0	26.9	19.1	10.2	C	
10-20	0.97	8.1	3.08	5.16	0.17	4.42	1.20	10.95	4.93	12.93	2.30	0.00	20.16	-	3.02	1826	93	41	54.3	27.1	18.6	10.0	C	
20-50	1.01	8.1	3.56	5.46	0.07	3.51	1.20	10.24	4.29	11.10	2.90	0.00	18.29	-	2.08	1367	58.5	39	59.5	21.6	18.9	6.5	C	
50-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Up-3																								
深さ cm	ECe dS m ⁻¹	pHe	SAR (mmole L ⁻¹) ^{1/2}	Na	K	飽和抽出										粒径組成								
						Ca mmole L ⁻¹	Mg	Total	Cl	SO ₄	HCO ₃ ⁻ mmole L ⁻¹	CO ₃	Total	CEC cmole kg ⁻¹	有機物含量 %	全N mg kg ⁻¹	Olsen-P mg kg ⁻¹	CaCO ₃ 当量 %	粘土	シルト %	砂	礫含量 %	土性区分 USDS	
0-10	1.15	7.9	3.25	5.76	0.37	4.57	1.70	12.40	6.70	11.16	3.75	0.00	21.61	37.8	5.03	3064	120.1	55	39.4	29.0	31.6	33.8	CL	
10-20	1.32	7.9	3.35	6.40	0.39	5.32	2.00	14.11	7.68	8.93	3.50	0.00	20.11	-	4.93	3089	125.3	56	39.4	28.8	31.8	40.7	CL	
20-50	1.34	7.8	3.18	6.08	0.35	5.53	1.80	13.76	7.14	10.19	3.40	0.00	20.73	-	4.93	2995	128.6	56	39.4	31.4	29.2	28.1	CL	
50-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Up-4																								
深さ cm	ECe dS m ⁻¹	pHe	SAR (mmole L ⁻¹) ^{1/2}	Na	K	飽和抽出										粒径組成								
						Ca mmole L ⁻¹	Mg	Total	Cl	SO ₄	HCO ₃ ⁻ mmole L ⁻¹	CO ₃	Total	CEC cmole kg ⁻¹	有機物含量 %	全N mg kg ⁻¹	Olsen-P mg kg ⁻¹	CaCO ₃ 当量 %	粘土	シルト %	砂	礫含量 %	土性区分 USDS	
0-10	1.17	7.9	2.33	4.31	0.52	5.32	1.50	11.65	5.54	8.76	3.80	0.00	18.10	39.2	3.54	2241	106.1	41	56.7	24.2	19.0	15.3	C	
10-20	1.45	7.9	2.59	5.46	0.72	5.96	2.90	15.04	5.89	7.15	3.65	0.00	16.69	-	3.57	2260	111.2	40	54.1	25.6	20.3	13.3	C	
20-50	1.10	7.9	2.87	4.87	0.37	4.47	1.30	11.01	5.00	8.24	3.00	0.00	16.24	-	2.81	1846	86.2	42	46.1	35.3	18.6	15.5	C	
50-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Up-5																								
深さ cm	ECe dS m ⁻¹	pHe	SAR (mmole L ⁻¹) ^{1/2}	Na	K	飽和抽出										粒径組成								
						Ca mmole L ⁻¹	Mg	Total	Cl	SO ₄	HCO ₃ ⁻ mmole L ⁻¹	CO ₃	Total	CEC cmole kg ⁻¹	有機物含量 %	全N mg kg ⁻¹	Olsen-P mg kg ⁻¹	CaCO ₃ 当量 %	粘土	シルト %	砂	礫含量 %	土性区分 USDS	
0-10	1.10	7.9	2.69	4.59	0.40	4.04	1.80	10.83	5.27	6.87	3.00	0.00	15.14	46.7	2.74	1732	97.5	32	51.4	27.0	21.6	7.2	C	
10-20	1.11	7.9	2.65	4.87	0.39	4.26	2.50	12.02	5.71	10.59	2.90	0.00	19.20	-	2.77	1720	97.7	33	53.6	24.1	22.3	5.3	C	
20-50	0.94	8.0	3.11	4.87	0.26	3.40	1.50	10.03	4.73	8.81	2.75	0.00	16.29	-	2.08	1289	78.5	35	53.7	24.3	22.0	10.8	C	
50-80	0.63	8.2	3.23	3.54	0.08	1.70	0.70	6.02	4.02	9.96	2.30	0.00	16.28	-	0.66	360	25.8	48	37.5	24.2	38.3	5.5	CL	
Up-6																								
深さ cm	ECe dS m ⁻¹	pHe	SAR (mmole L ⁻¹) ^{1/2}	Na	K	飽和抽出										粒径組成								
						Ca mmole L ⁻¹	Mg	Total	Cl	SO ₄	HCO ₃ ⁻ mmole L ⁻¹	CO ₃	Total	CEC cmole kg ⁻¹	有機物含量 %	全N mg kg ⁻¹	Olsen-P mg kg ⁻¹	CaCO ₃ 当量 %	粘土	シルト %	砂	礫含量 %	土性区分 USDS	
0-10	1.25	7.9	3.04	5.46	0.42	4.47	2.00	12.35	5.71	6.92	2.75	0.00	15.38	37.8	2.98	1804	102.7	47	53.9	27.1	19.0	9.4	C	
10-20	1.38	7.9	3.28	6.40	0.44	5.53	2.10	14.47	6.43	9.79	3.40	0.00	19.62	-	3.09	1925	112.4	48	55.6	25.4	19.0	6.9	C	
20-50	1.04	7.9	3.64	5.76	0.28	3.72	1.30	11.06	5.54	8.13	2.80	0.00	16.47	-	2.32	1455	101.9	48	55.7	23.9	20.5	6.0	C	
50-80	1.05	8.2	4.32	6.08	0.08	2.77	1.20	10.13	6.96	7.61	2.00	0.00	16.57	-	0.87	577	22.8	42	61.8	21.5	16.8	5.3	C	

付表 3 続き

Mid-1		飽和抽出													粒徑組成								
深さ cm	ECe dS m ⁻¹	pHe	SAR (mmole L ⁻¹) ^f	Na	K	Ca mmole L ⁻¹	Mg	Total	Cl	SO ₄	HCO ₃ mmole L ⁻¹	CO ₃	Total	CEC cmole kg ⁻¹	有機物含量 %	全N mg kg ⁻¹	Olsen-P mg kg ⁻¹	CaCO ₃ 当量 %	粘土	シルト %	砂	礫含量 %	土性区分 USDS
0-10	0.73	8.1	2.60	3.54	0.13	3.62	0.10	7.39	4.84	7.32	2.80	0.00	14.96	39.2	1.61	1020	28.9	47	53.9	27.0	19.1	9.7	C
10-20	0.83	8.2	3.69	4.87	0.13	3.19	0.30	8.49	4.84	7.27	2.90	0.00	15.01	-	1.61	1036	27.9	46	56.0	26.8	17.2	10.4	C
20-50	0.97	8.2	5.18	6.73	0.05	2.98	0.40	10.16	5.66	9.04	2.10	0.00	16.80	-	0.95	644	6.4	47	61.8	24.4	13.9	3.5	C
50-80	1.54	8.2	8.90	12.22	0.03	2.77	1.00	16.02	10.05	8.24	2.10	0.00	20.39	-	0.49	406	3.1	45	61.6	26.8	11.7	2.8	C

Mid-2		飽和抽出													粒徑組成								
深さ cm	ECe dS m ⁻¹	pHe	SAR (mmole L ⁻¹) ^f	Na	K	Ca mmole L ⁻¹	Mg	Total	Cl	SO ₄	HCO ₃ mmole L ⁻¹	CO ₃	Total	CEC cmole kg ⁻¹	有機物含量 %	全N mg kg ⁻¹	Olsen-P mg kg ⁻¹	CaCO ₃ 当量 %	粘土	シルト %	砂	礫含量 %	土性区分 USDS
0-10	0.73	8.2	3.28	4.31	0.05	2.45	1.00	7.81	6.76	7.50	2.80	0.00	17.06	39.2	1.19	791	23.1	47	54.3	26.0	19.8	11.0	C
10-20	0.72	8.3	4.15	4.87	0.05	2.45	0.30	7.67	5.02	9.21	2.80	0.00	17.03	-	1.30	827	21.2	47	54.2	24.5	21.3	6.0	C
20-50	1.07	8.3	5.26	7.42	0.02	2.98	1.00	11.42	6.30	9.10	2.30	0.00	17.70	-	0.81	620	8.6	47	54.4	27.2	18.4	5.6	C
50-80	1.66	8.2	7.55	12.68	0.02	4.04	1.60	18.34	10.50	9.38	2.00	0.00	21.88	-	0.39	404	2.3	46	61.4	26.1	12.5	2.7	C

Mid-3		飽和抽出													粒徑組成								
深さ cm	ECe dS m ⁻¹	pHe	SAR (mmole L ⁻¹) ^f	Na	K	Ca mmole L ⁻¹	Mg	Total	Cl	SO ₄	HCO ₃ mmole L ⁻¹	CO ₃	Total	CEC cmole kg ⁻¹	有機物含量 %	全N mg kg ⁻¹	Olsen-P mg kg ⁻¹	CaCO ₃ 当量 %	粘土	シルト %	砂	礫含量 %	土性区分 USDS
0-10	0.88	8.2	3.09	4.59	0.06	3.40	1.00	9.05	5.11	7.90	2.40	0.00	15.41	39.2	1.12	816	14.0	45	54.3	24.3	21.3	6.4	C
10-20	0.95	8.1	3.71	5.46	0.07	3.94	0.40	9.87	5.94	5.26	2.65	0.00	13.85	-	1.19	854	14.3	45	53.7	26.6	19.8	6.4	C
20-50	0.80	8.2	3.92	5.16	0.03	2.87	0.60	8.66	4.57	6.58	2.20	0.00	13.35	-	0.91	678	5.6	45	56.0	23.9	20.1	4.6	C
50-80	1.28	8.1	4.51	7.77	0.02	2.34	3.60	13.73	7.76	10.30	1.80	0.00	19.86	-	0.49	391	3.2	45	56.1	29.3	14.7	3.6	C

Mid-4		飽和抽出													粒徑組成								
深さ cm	ECe dS m ⁻¹	pHe	SAR (mmole L ⁻¹) ^f	Na	K	Ca mmole L ⁻¹	Mg	Total	Cl	SO ₄	HCO ₃ mmole L ⁻¹	CO ₃	Total	CEC cmole kg ⁻¹	有機物含量 %	全N mg kg ⁻¹	Olsen-P mg kg ⁻¹	CaCO ₃ 当量 %	粘土	シルト %	砂	礫含量 %	土性区分 USDS
0-10	0.94	8.2	3.17	4.87	0.21	3.62	1.10	9.80	5.57	6.75	1.80	0.00	14.12	39.2	1.53	1014	30.0	41	61.2	25.0	13.8	4.5	C
10-20	0.94	8.2	3.40	5.16	0.21	3.30	1.30	9.97	5.66	7.32	2.50	0.00	15.48	-	1.56	1007	29.0	41	61.6	25.4	13.0	4.3	C
20-50	0.94	8.4	4.05	6.40	0.11	3.99	1.00	11.50	5.66	7.67	2.50	0.00	15.83	-	1.32	906	17.9	42	64.0	21.4	14.6	4.9	C
50-80	1.34	8.2	6.93	10.08	0.02	2.53	1.70	14.33	7.31	15.05	2.60	0.00	24.96	-	0.59	487	4.1	41	64.3	24.2	11.5	2.7	C

Mid-5		飽和抽出													粒徑組成								
深さ cm	ECe dS m ⁻¹	pHe	SAR (mmole L ⁻¹) ^f	Na	K	Ca mmole L ⁻¹	Mg	Total	Cl	SO ₄	HCO ₃ mmole L ⁻¹	CO ₃	Total	CEC cmole kg ⁻¹	有機物含量 %	全N mg kg ⁻¹	Olsen-P mg kg ⁻¹	CaCO ₃ 当量 %	粘土	シルト %	砂	礫含量 %	土性区分 USDS
0-10	2.65	8.1	5.25	14.09	0.26	10.11	4.30	28.76	18.15	23.75	2.70	0.00	44.60	46.7	1.70	1047	34.6	42	74.5	23.1	2.4	3.0	C
10-20	2.50	8.2	7.20	16.60	0.23	6.63	4.00	27.46	15.68	23.98	2.20	0.00	41.86	-	1.66	1067	28.6	42	68.0	24.5	7.5	2.0	C
20-50	3.65	8.1	8.81	24.10	0.10	9.05	5.90	39.15	24.67	26.78	1.85	0.00	53.30	-	0.76	600	10.9	40	65.3	27.3	7.5	1.9	C
50-80	4.21	8.1	9.70	29.40	0.05	9.16	9.20	47.81	28.72	28.50	1.65	0.00	58.87	-	0.49	382	4.9	40	68.0	27.4	4.6	1.4	C

Mid-6		飽和抽出													粒徑組成								
深さ cm	ECe dS m ⁻¹	pHe	SAR (mmole L ⁻¹) ^f	Na	K	Ca mmole L ⁻¹	Mg	Total	Cl	SO ₄	HCO ₃ mmole L ⁻¹	CO ₃	Total	CEC cmole kg ⁻¹	有機物含量 %	全N mg kg ⁻¹	Olsen-P mg kg ⁻¹	CaCO ₃ 当量 %	粘土	シルト %	砂	礫含量 %	土性区分 USDS
0-10	1.35	8.1	3.05	6.08	0.26	5.26	2.70	14.30	6.87	13.39	2.80	0.00	23.06	37.8	1.70	1134	41.5	42	62.1	24.4	13.5	6.4	C
10-20	0.95	8.1	2.94	4.87	0.17	3.47	2.00	10.51	5.20	10.36	2.50	0.00	18.06	-	1.70	1065	36.2	44	58.2	23.8	17.9	5.0	C
20-50	0.91	8.2	3.48	4.87	0.06	2.11	1.80	8.84	5.81	9.84	2.35	0.00	18.00	-	0.94	712	17.2	43	61.7	21.5	16.9	4.0	C
50-80	1.15	8.2	5.60	8.51	0.02	2.42	2.20	13.15	6.70	20.37	2.40	0.00	29.47	-	0.55	429	6.5	43	59.0	29.5	11.5	2.8	C

付表 3 続き

Down-1																									
深さ cm	ECe dS m ⁻¹	pHe	SAR (mmole L ⁻¹) ¹	Na	K	飽和抽出				Cl	SO ₄	HCO ₃ ⁻ mmole L ⁻¹	CO ₃	Total	CEC cmole kg ⁻¹	有機物含量 %	全N mg kg ⁻¹	Olsen-P mg kg ⁻¹	CaCO ₃ 当量 %	粘土	シルト %	粒径組成			土性区分 USDS
						Ca mmole L ⁻¹	Mg	Total	砂													礫含量 %			
0-10	1.92	8.4	8.39	12.68	0.12	3.47	1.10	17.37	10.49	11.50	4.60	0.00	26.59	56.4	1.37	807	14.6	40	77.0	20.4	2.6	0.6	C		
10-20	1.92	8.3	8.95	13.61	0.11	3.13	1.50	18.35	9.78	12.53	4.30	0.40	27.01	-	1.44	877	13.5	39	73.2	23.2	3.6	0.0	C		
20-50	3.62	8.2	11.72	26.03	0.15	5.56	4.30	36.04	16.00	30.21	3.50	0.40	50.11	-	1.16	766	11.8	39	74.7	22.0	3.4	0.8	C		
50-80	9.35	8.1	12.94	64.50	0.31	24.31	25.40	114.52	35.56	96.88	2.40	0.00	134.84	-	0.67	468	5.4	38	27.7	70.7	1.7	2.2	SiCL		

Down-2																									
深さ cm	ECe dS m ⁻¹	pHe	SAR (mmole L ⁻¹) ¹	Na	K	飽和抽出				Cl	SO ₄	HCO ₃ ⁻ mmole L ⁻¹	CO ₃	Total	CEC cmole kg ⁻¹	有機物含量 %	全N mg kg ⁻¹	Olsen-P mg kg ⁻¹	CaCO ₃ 当量 %	粘土	シルト %	粒径組成			土性区分 USDS
						Ca mmole L ⁻¹	Mg	Total	砂													礫含量 %			
0-10	1.33	8.4	6.63	10.08	0.06	3.82	0.80	14.76	7.82	10.93	4.40	0.70	23.85	46.7	1.51	895	17.3	38	74.7	24.9	0.4	0.2	C		
10-20	1.73	8.2	10.36	13.61	0.05	2.95	0.50	17.11	7.11	11.90	4.10	0.40	23.51	-	1.47	885	13.5	39	78.1	21.3	0.6	0.1	C		
20-50	3.01	8.3	13.77	23.47	0.07	4.51	1.30	29.35	10.67	22.60	2.80	0.40	36.47	-	1.47	845	13.1	39	79.0	18.9	2.1	0.2	C		
50-80	8.35	8.1	14.00	60.20	0.17	17.36	19.60	97.33	30.67	81.83	2.00	0.00	114.50	-	0.63	473	5.0	35	84.8	13.5	1.7	0.1	C		

Down-3																									
深さ cm	ECe dS m ⁻¹	pHe	SAR (mmole L ⁻¹) ¹	Na	K	飽和抽出				Cl	SO ₄	HCO ₃ ⁻ mmole L ⁻¹	CO ₃	Total	CEC cmole kg ⁻¹	有機物含量 %	全N mg kg ⁻¹	Olsen-P mg kg ⁻¹	CaCO ₃ 当量 %	粘土	シルト %	粒径組成			土性区分 USDS
						Ca mmole L ⁻¹	Mg	Total	砂													礫含量 %			
0-10	1.08	8.2	4.67	7.07	0.05	2.08	2.50	11.70	6.93	9.33	3.80	0.40	20.46	46.7	1.12	804	13.8	42	66.1	24.6	9.3	2.5	C		
10-20	1.14	8.2	6.14	8.51	0.05	1.74	2.10	12.40	6.93	7.61	3.85	0.40	18.79	-	1.02	760	11.9	44	63.5	24.6	11.9	0.0	C		
20-50	1.62	8.1	8.19	12.22	0.05	2.95	1.50	16.72	6.22	17.00	3.20	0.40	26.82	-	0.88	612	8.1	41	70.0	18.8	11.2	2.1	C		
50-80	2.14	8.2	12.36	16.60	0.04	1.91	1.70	20.25	7.73	19.63	3.10	0.00	30.46	-	0.39	412	3.3	42	70.1	18.8	11.1	1.7	C		

Down-4																									
深さ cm	ECe dS m ⁻¹	pHe	SAR (mmole L ⁻¹) ¹	Na	K	飽和抽出				Cl	SO ₄	HCO ₃ ⁻ mmole L ⁻¹	CO ₃	Total	CEC cmole kg ⁻¹	有機物含量 %	全N mg kg ⁻¹	Olsen-P mg kg ⁻¹	CaCO ₃ 当量 %	粘土	シルト %	粒径組成			土性区分 USDS
						Ca mmole L ⁻¹	Mg	Total	砂													礫含量 %			
0-10	0.92	8.2	4.73	6.40	0.04	1.56	2.10	10.10	4.71	8.58	2.70	0.40	16.39	51.4	1.16	742	8.2	40	77.0	21.9	1.2	0.5	C		
10-20	1.18	8.3	8.05	9.28	0.04	1.56	1.10	11.98	3.73	8.47	4.10	0.40	16.70	-	1.12	742	8.0	40	77.8	22.1	0.1	0.3	C		
20-50	1.39	8.3	8.12	10.91	0.05	1.91	1.70	14.57	4.98	15.11	3.50	0.00	23.59	-	1.16	735	6.9	40	77.5	20.4	2.1	0.6	C		
50-80	3.45	8.1	10.81	25.38	0.08	5.73	5.30	36.49	12.89	32.16	2.20	0.00	47.25	-	0.67	517	4.1	39	76.4	23.2	0.4	0.2	C		

Down-5																									
深さ cm	ECe dS m ⁻¹	pHe	SAR (mmole L ⁻¹) ¹	Na	K	飽和抽出				Cl	SO ₄	HCO ₃ ⁻ mmole L ⁻¹	CO ₃	Total	CEC cmole kg ⁻¹	有機物含量 %	全N mg kg ⁻¹	Olsen-P mg kg ⁻¹	CaCO ₃ 当量 %	粘土	シルト %	粒径組成			土性区分 USDS
						Ca mmole L ⁻¹	Mg	Total	砂													礫含量 %			
0-10	2.03	8.1	5.02	11.34	0.20	5.21	5.00	21.75	11.20	9.67	4.80	1.00	26.67	46.7	1.82	1181	34.5	41	68.1	19.1	12.8	1.2	C		
10-20	1.27	8.2	6.08	8.89	0.10	2.78	1.50	13.27	7.29	9.73	4.50	0.40	21.92	-	1.65	993	24.8	41	70.3	24.4	5.3	1.1	C		
20-50	1.29	8.3	7.98	9.67	0.05	1.74	1.20	12.66	5.60	13.85	3.60	0.00	23.05	-	1.02	688	13.7	41	69.8	16.2	14.1	1.0	C		
50-80	3.34	8.2	12.18	27.35	0.10	6.38	3.70	37.53	12.24	23.12	2.60	0.00	37.96	-	0.56	415	5.5	40	69.9	21.6	8.5	0.8	C		

Down-6																									
深さ cm	ECe dS m ⁻¹	pHe	SAR (mmole L ⁻¹) ¹	Na	K	飽和抽出				Cl	SO ₄	HCO ₃ ⁻ mmole L ⁻¹	CO ₃	Total	CEC cmole kg ⁻¹	有機物含量 %	全N mg kg ⁻¹	Olsen-P mg kg ⁻¹	CaCO ₃ 当量 %	粘土	シルト %	粒径組成			土性区分 USDS
						Ca mmole L ⁻¹	Mg	Total	砂													礫含量 %			
0-10	1.24	8.4	7.32	10.08	0.07	1.49	2.30	13.94	7.49	10.30	2.90	0.00	20.69	51.4	1.37	932	24.8	39	71.0	27.5	1.5	0.2	C		
10-20	1.66	8.4	9.70	13.61	0.08	2.34	1.60	17.63	8.49	8.81	2.65	0.00	19.95	-	1.44	932	24.2	38	70.1	27.2	2.7	0.2	C		
20-50	3.00	8.3	11.80	24.10	0.11	5.74	2.60	32.55	14.25	16.08	2.60	0.00	32.93	-	1.26	809	19.4	38	68.6	28.5	2.9	0.0	C		
50-80	5.12	8.1	14.91	44.50	0.14	10.21	7.60	62.45	22.65	20.54	2.10	0.00	45.29	-	0.74	483	6.6	37	73.2	24.5	2.3	0.2	C		

付表 4 シリア国アレッポ近郊地域・都市下水灌漑農地の表層土の重金属特性

表 A4-1 都市下水灌漑農地の全重金属含量および可給態重金属含量

	全重金属含量 (HNO ₃ -HCl 分解)								可給態重金属含量 (DTPA 抽出)							
	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
	mg kg ⁻¹								mg kg ⁻¹							
Up-1	1.60	96.67	39.90	30302	521.4	81.80	59.00	52.60	0.02	BDL	2.72	5.70	9.44	0.61	3.37	2.03
Up-2	2.42	138.9	67.50	31202	613.3	88.79	337.7	116.9	0.06	BDL	8.41	4.67	16.92	1.58	54.57	7.21
Up-3	2.46	204.8	73.16	22676	521.2	67.02	168.3	142.6	0.08	BDL	8.33	7.76	21.39	2.15	20.61	14.22
Up-4	2.36	167.3	71.50	34488	634.8	95.52	78.96	118.5	0.05	BDL	7.38	3.22	17.95	1.31	2.96	6.59
Up-5	2.05	107.8	43.31	42517	688.9	101.48	48.61	83.83	0.03	0.62	2.61	3.44	14.71	1.13	0.76	3.46
Up-6	1.69	112.6	58.66	29011	518.7	76.13	45.26	79.78	0.04	BDL	3.00	3.23	12.99	1.07	2.21	5.12
Mid-1	1.66	85.48	33.33	37192	565.8	78.95	43.99	49.87	0.02	BDL	1.25	3.12	11.90	0.95	0.06	0.56
Mid-2	1.84	89.74	43.25	34121	644.2	86.57	40.64	53.18	0.02	BDL	1.33	3.19	8.90	0.81	0.04	0.49
Mid-3	1.72	89.95	43.63	35151	659.5	85.70	42.61	54.01	0.02	BDL	1.43	3.27	9.12	0.76	0.05	0.50
Mid-4	1.70	96.35	50.06	36737	658.9	93.60	45.47	66.39	0.02	BDL	1.98	3.99	7.31	0.84	0.40	1.07
Mid-5	2.14	96.33	33.69	40809	691.0	98.32	46.44	70.30	0.02	BDL	1.78	3.27	7.14	0.68	0.32	1.19
Mid-6	2.22	100.2	51.78	34904	669.5	94.29	61.43	65.37	0.02	BDL	2.11	3.69	8.84	0.80	0.67	1.86
Down-1	1.46	90.08	32.14	39008	534.4	89.09	42.42	56.70	0.01	BDL	2.03	9.17	8.41	0.97	0.32	0.50
Down-2	1.54	93.26	31.97	42338	524.4	94.31	46.03	56.38	-	-	-	-	-	-	-	-
Down-3	1.28	123.88	29.68	39020	712.5	124.05	47.32	64.93	0.01	BDL	1.46	4.95	6.53	0.78	0.02	0.55
Down-4	1.87	114.0	45.27	41267	625.6	117.47	44.19	65.07	0.01	BDL	1.97	10.09	4.70	0.81	0.29	0.30
Down-5	1.58	97.98	39.37	39432	559.0	93.64	45.78	63.37	0.03	BDL	2.59	7.51	8.15	1.10	0.43	5.47
Down-6	1.81	127.8	35.95	40665	691.8	131.55	53.93	72.15	0.02	BDL	2.33	8.61	4.53	0.83	0.62	0.73

表 A4-2 都市下水灌漑農地の表層土壌における化学的形態別重金属含量

	Cd					Cr					Cu					Fe				
	Exch	Carb	Feo/Mno mg kg ⁻¹	OM	Res	Exch	Carb	Feo/Mno mg kg ⁻¹	OM	Res	Exch	Carb	Feo/Mno mg kg ⁻¹	OM	Res	Exch	Carb	Feo/Mno mg kg ⁻¹	OM	Res
Up-1	0.04	0.50	0.62	0.15	0.26	BDL	0.84	13.05	17.48	65.52	BDL	0.63	10.08	5.93	19.75	BDL	3.26	724	1987	27588
Up-2	0.21	1.05	0.67	0.31	0.29	0.12	1.67	32.70	44.07	68.38	0.3	1.34	15.05	11.57	28.66	BDL	6.35	451	2014	28730
Up-3	BDL	0.85	0.83	0.28	0.22	BDL	1.67	79.12	80.48	51.24	0.2	1.16	12.96	15.23	23.94	BDL	5.22	460	1664	20546
Up-4	0.23	0.86	0.60	0.29	0.28	0.13	1.58	49.63	56.57	68.67	0.3	1.03	16.45	12.41	31.27	BDL	5.62	509	2252	31721
Up-5	0.17	0.83	0.55	0.31	0.31	0.05	1.39	22.77	35.52	77.95	0.2	0.83	16.96	9.47	30.85	BDL	5.40	611	2477	39423
Up-6	0.41	1.12	0.72	0.28	0.24	0.33	1.99	29.05	38.64	61.31	0.4	1.29	12.91	9.05	24.46	BDL	7.63	445	2081	26477
Mid-1	0.09	0.43	0.55	0.28	0.33	BDL	0.59	6.84	20.39	78.84	BDL	0.22	10.75	4.83	22.83	BDL	2.91	687	2083	34418
Mid-2	0.10	0.44	0.54	0.32	0.29	0.01	0.63	7.99	22.54	68.34	BDL	0.22	8.52	6.40	18.81	BDL	2.86	763	3288	30068
Mid-3	0.06	0.24	0.42	0.20	0.33	BDL	0.36	7.82	19.02	74.95	BDL	0.01	9.78	4.79	21.15	BDL	1.58	715	1659	32776
Mid-4	0.08	0.50	0.51	0.23	0.32	BDL	0.74	7.67	22.27	78.84	BDL	0.32	13.22	5.95	26.15	BDL	3.28	474	1867	34393
Mid-5	0.07	0.59	0.52	0.25	0.34	BDL	0.83	9.90	24.45	85.12	0.0	0.38	14.11	6.15	26.84	BDL	3.62	546	1946	38314
Mid-6	0.18	0.57	0.56	0.27	0.31	0.07	0.84	11.44	25.16	75.18	0.1	0.43	12.88	6.55	24.59	BDL	3.71	511	1986	32404
Down-1	0.10	0.41	0.43	0.24	0.32	0.03	0.61	6.28	17.58	79.69	0.0	0.27	11.79	5.08	24.28	BDL	3.16	569	1940	36495
Down-2	0.04	0.40	0.42	0.21	0.33	BDL	0.59	7.23	18.74	88.49	BDL	0.23	12.93	4.96	25.90	BDL	2.75	708	1778	39849
Down-3	BDL	0.39	0.47	0.20	0.36	BDL	0.61	9.77	18.68	80.27	BDL	0.24	11.97	4.13	24.52	BDL	2.69	887	1667	36463
Down-4	0.04	0.44	0.45	0.16	0.35	BDL	0.64	7.07	18.04	86.95	BDL	0.29	12.23	4.68	25.58	0.27	3.22	734	1796	38734
Down-5	0.13	0.42	0.51	0.18	0.31	0.07	0.62	10.81	22.27	80.60	0.1	0.30	13.59	5.91	26.50	0.05	2.93	775	1984	36671
Down-6	0.06	0.47	0.43	0.21	0.36	BDL	0.68	9.35	19.71	84.78	BDL	0.40	13.25	6.38	26.04	1.05	3.41	746	1886	38030

表 A4-2 続き

	Mn					Ni					Pb					Zn				
	Exch	Carb	Feo/Mno mg kg ⁻¹	OM	Res	Exch	Carb	Feo/Mno mg kg ⁻¹	OM	Res	Exch	Carb	Feo/Mno mg kg ⁻¹	OM	Res	Exch	Carb	Feo/Mno mg kg ⁻¹	OM	Res
Up-1	4.92	42.8	328.4	55.97	110.8	BDL	2.62	19.42	24.87	25.52	18.70	5.80	64.81	0.85	3.53	BDL	2.06	10.26	11.10	30.24
Up-2	10.02	54.0	387.0	83.44	136.6	0.46	5.03	20.88	29.66	25.10	8.87	25.04	272.2	7.28	18.57	BDL	7.70	31.57	23.75	45.89
Up-3	10.92	50.7	294.7	61.93	95.48	BDL	4.36	15.81	25.06	16.57	3.01	12.71	168.5	3.78	19.40	BDL	16.00	55.17	30.06	35.14
Up-4	16.72	56.9	434.5	89.83	138.6	0.50	4.10	20.18	33.19	27.32	4.38	9.87	69.82	1.71	6.07	BDL	6.28	28.20	23.25	48.35
Up-5	8.50	48.0	467.3	101.8	158.0	0.44	4.17	26.90	40.64	34.11	4.99	8.84	40.09	1.45	5.33	0.01	3.73	16.70	18.38	47.34
Up-6	12.77	72.7	298.8	67.27	118.0	1.26	5.22	16.68	27.91	23.96	7.09	12.29	73.08	1.35	1.94	BDL	6.50	23.59	18.99	40.97
Mid-1	1.97	31.0	423.5	90.50	166.3	BDL	2.13	22.52	30.74	28.38	2.59	4.13	42.43	1.10	4.82	BDL	0.57	4.72	10.22	39.65
Mid-2	0.69	26.3	435.1	88.86	143.8	BDL	2.14	22.94	30.10	24.29	3.09	4.35	41.28	1.18	3.58	BDL	0.56	4.76	12.59	32.90
Mid-3	0.75	25.8	484.5	93.34	157.4	BDL	1.41	22.39	28.69	27.28	2.29	1.91	40.52	0.95	4.47	BDL	0.48	4.57	10.14	38.18
Mid-4	0.16	31.0	436.8	103.3	168.2	BDL	2.34	22.96	31.98	30.59	2.66	4.86	39.91	1.11	4.88	BDL	0.90	7.68	12.82	45.69
Mid-5	0.66	36.1	447.9	106.4	168.5	BDL	2.75	25.63	35.04	33.38	3.21	5.80	36.57	1.14	4.67	BDL	0.96	7.87	13.43	47.34
Mid-6	2.20	41.5	427.7	95.41	152.3	0.22	2.78	24.04	31.52	28.46	5.19	5.96	46.60	1.18	4.78	0.00	1.53	10.85	14.46	42.83
Down-1	0.27	88.2	425.3	87.40	139.2	BDL	1.97	25.56	27.95	32.95	2.98	3.64	30.04	0.99	3.43	BDL	0.51	6.73	10.81	44.89
Down-2	0.52	91.2	359.6	86.97	148.4	BDL	1.96	26.53	31.29	36.31	1.75	3.88	27.30	0.95	3.78	0.12	0.39	5.24	10.25	45.70
Down-3	BDL	28.8	419.0	84.91	158.6	BDL	1.97	27.78	29.21	31.56	3.67	3.54	34.33	0.86	3.99	0.09	0.49	5.98	8.96	41.24
Down-4	0.02	80.5	372.8	85.53	130.1	BDL	2.13	26.91	30.65	36.12	2.42	4.16	30.89	0.78	3.72	0.11	0.40	5.30	9.72	44.68
Down-5	0.70	54.0	373.6	83.48	152.0	0.05	2.27	26.68	30.72	31.97	3.91	3.92	38.21	0.88	4.26	0.05	1.56	12.74	12.40	44.27
Down-6	BDL	67.7	384.4	86.54	145.5	BDL	2.34	26.70	29.74	34.50	3.32	4.39	32.45	1.01	4.18	0.15	0.79	7.86	11.50	43.89

表 A4-3 都市下水灌漑農地の表層土壌における選択溶解法による化学的形態別重金属含量

	Cd				Cr				Cu				Fe			
	RRO	Amor1	Amor2	Cry	RRO	Amor1	Amor2	Cry	RRO	Amor1	Amor2	Cry	RRO	Amor1	Amor2	Cry
	mg kg ⁻¹				mg kg ⁻¹				mg kg ⁻¹				mg kg ⁻¹			
Up-1	0.68	0.59	0.28	0.50	2.57	13.05	4.78	42.80	3.32	10.08	9.03	21.29	652	728	650	12271
Up-2	0.77	0.64	0.27	0.58	3.38	32.70	12.63	91.97	3.92	15.05	20.45	29.75	374	455	772	13068
Up-3	0.92	0.80	0.33	0.41	5.83	79.12	31.14	178.3	5.18	12.96	20.32	25.34	438	464	847	10247
Up-4	0.81	0.57	0.26	0.50	3.85	49.63	17.11	114.1	3.43	16.45	17.86	26.92	364	513	928	13530
Up-5	0.54	0.52	0.27	0.60	2.32	22.77	11.97	77.72	1.90	16.96	12.73	25.03	340	615	989	16081
Up-6	0.85	0.69	0.31	0.53	4.24	29.05	11.22	77.93	3.23	12.91	18.22	22.57	403	449	718	12403
Mid-1	0.65	0.52	0.20	0.64	1.79	6.84	2.17	46.40	1.67	10.75	6.07	19.92	326	691	641	15720
Mid-2	0.67	0.51	1.16	0.63	1.88	7.99	1.88	46.50	1.80	8.52	4.81	19.01	369	767	651	14731
Mid-3	0.69	0.39	0.38	0.65	1.95	7.82	2.91	46.60	1.92	9.78	8.73	20.44	375	719	594	15235
Mid-4	0.61	0.49	1.14	0.63	1.83	7.67	2.97	43.89	1.77	13.22	4.90	22.25	317	478	663	14177
Mid-5	0.59	0.49	0.42	0.68	1.89	9.90	4.49	51.50	1.59	14.11	10.16	21.73	373	550	905	14456
Mid-6	0.68	0.53	0.35	0.58	2.27	11.44	4.63	46.90	2.18	12.88	11.37	19.48	357	515	753	13274
Down-1	0.46	0.40	0.44	0.84	1.65	6.28	4.63	43.33	1.36	11.79	10.62	21.08	607	573	1363	13083
Down-2	0.45	0.39	0.38	0.59	1.58	7.23	4.13	45.25	1.28	12.93	7.92	17.81	787	712	1455	10980
Down-3	0.48	0.45	0.24	0.60	1.70	9.77	4.24	50.19	1.33	11.97	4.61	18.76	434	891	1005	12221
Down-4	0.51	0.43	0.28	0.58	1.76	7.07	3.74	40.92	1.50	12.23	7.40	16.73	880	738	1437	10268
Down-5	0.52	0.48	0.24	0.67	1.95	10.81	4.70	54.27	1.83	13.59	8.17	21.62	634	779	1143	14905
Down-6	0.54	0.40	0.31	0.61	2.02	9.35	5.06	43.74	1.83	13.25	10.59	21.54	732	750	1436	12870

表 A4-3 続き

	Mn				Ni				Pb				Zn			
	RRO	Amor1	Amor2	Cry	RRO	Amor1	Amor2	Cry	RRO	Amor1	Amor2	Cry	RRO	Amor1	Amor2	Cry
	mg kg ⁻¹				mg kg ⁻¹				mg kg ⁻¹				mg kg ⁻¹			
Up-1	263	328	301	205	8.34	19.93	11.09	38.96	44.60	64.81	3.24	10.75	8.44	10.26	5.65	26.28
Up-2	309	387	407	275	7.83	21.38	14.33	39.28	153.5	272.2	8.89	27.56	15.70	31.57	29.43	60.13
Up-3	260	295	316	176	7.48	16.30	13.02	31.02	116.5	168.5	8.25	15.47	37.51	55.17	54.63	86.94
Up-4	363	435	353	256	7.30	20.66	12.51	36.23	51.49	69.82	BDL	11.10	14.27	28.20	27.39	54.88
Up-5	373	467	458	315	7.67	27.40	15.57	44.37	28.05	40.09	BDL	11.47	7.02	16.70	14.31	37.00
Up-6	258	299	258	172	6.92	17.18	10.36	35.10	56.19	73.08	BDL	10.70	12.02	23.59	21.82	47.77
Mid-1	352	424	443	314	8.60	23.02	13.75	37.97	35.82	42.43	0.58	9.52	1.93	4.72	1.47	19.20
Mid-2	400	435	468	316	9.76	23.44	12.01	35.89	35.23	41.28	4.18	10.05	1.83	4.76	1.84	16.99
Mid-3	387	484	490	342	9.44	22.90	13.76	37.84	36.96	40.52	6.08	9.92	1.73	4.57	2.25	18.42
Mid-4	375	437	436	345	8.58	23.45	11.83	40.55	32.36	39.91	0.99	9.95	2.95	7.68	9.83	25.64
Mid-5	465	448	497	354	10.60	26.13	16.75	41.97	28.94	36.57	0.04	12.38	3.06	7.87	5.56	47.79
Mid-6	391	428	452	330	9.77	24.56	14.08	41.35	37.51	46.60	BDL	9.11	4.64	10.85	7.92	30.38
Down-1	349	425	421	289	8.94	26.05	16.76	41.86	24.18	30.04	5.99	13.33	2.11	6.73	16.91	22.49
Down-2	303	360	402	269	7.88	27.02	15.18	32.71	21.95	27.30	2.45	14.00	1.40	5.24	8.07	15.49
Down-3	343	419	451	288	10.03	28.27	17.28	34.36	25.61	34.33	2.39	11.54	1.62	5.98	3.73	18.50
Down-4	342	373	405	273	8.45	27.40	14.57	30.99	25.92	30.89	2.07	10.74	1.34	5.30	3.08	14.99
Down-5	337	374	407	276	9.02	27.17	15.41	42.22	27.61	38.21	2.62	13.04	3.90	12.74	9.66	28.77
Down-6	344	384	422	267	8.93	27.21	15.26	36.59	27.46	32.45	1.16	12.23	2.42	7.86	4.64	18.69

*RRO は室温塩酸ヒドロキシルアミン溶解法, Amor1 は加熱塩酸ヒドロキシルアミン溶解法, Amor2 は酸性シュウ酸性アンモニウム溶解法および Cry は酸性シュウ酸性アンモニウムーアスコルビン酸溶解法による.

付表 5 シリア国アレッポ近郊地域・地下水灌漑農地の表層土の重金属特性

表 A5-1 地下水灌漑農地の一般理化学性

	飽和抽出										粒径組成				
	ECe	pHe	SAR	Na	K	Ca	Mg	Total	CEC	有機物含量	炭酸カルシウム当量	粘土	シルト	砂	土性区分
	dS m ⁻¹		(mmolc L ⁻¹) ^{0.5}			mmolc L ⁻¹			cmolc kg ⁻¹		g kg ⁻¹				USDS
GW-1	0.78	7.9	1.33	2.36	0.07	4.20	2.10	8.72	47.3	16.8	198	618	264	119	C
GW-2	1.34	7.8	2.44	5.16	0.08	6.00	2.95	14.19	50.5	13.2	229	732	243	26	C
GW-3	0.97	7.9	1.98	3.75	0.14	4.80	2.40	11.09	48.9	15.6	214	702	246	52	C
GW-4	0.80	7.9	1.63	3.18	0.07	5.30	2.30	10.85	45.8	16.4	203	631	209	160	C
GW-5	0.99	7.9	1.83	3.64	0.09	6.40	1.50	11.63	50.5	14.7	226	685	236	80	C
GW-6	0.79	7.9	2.13	3.54	0.06	4.80	0.70	9.10	48.9	16.4	222	671	275	54	C
GW-7	1.69	7.9	3.86	8.33	0.15	5.80	3.50	17.78	55.4	22.5	132	679	208	113	C
GW-8	0.78	7.8	1.85	3.54	0.05	5.40	1.90	10.89	47.3	12.3	245	712	237	51	C
GW-9	0.84	7.8	1.79	3.03	0.06	5.20	0.50	8.79	53.7	12.6	236	696	223	81	C
GW-10	0.81	7.7	1.58	2.66	0.06	5.20	0.50	8.42	52.1	14.0	207	686	223	91	C
GW-11	1.81	7.7	1.79	5.00	0.30	10.40	5.20	20.90	47.3	14.0	240	631	269	100	C
GW-12	1.59	7.7	1.66	4.64	0.19	11.00	4.60	20.43	57.0	17.4	203	715	205	80	C
GW-13	1.97	7.5	0.99	3.13	0.25	15.20	4.90	23.48	57.0	26.6	189	645	213	142	C
GW-14	0.77	7.8	1.30	2.30	0.09	5.40	0.90	8.69	60.5	16.4	189	726	200	74	C
GW-15	0.73	7.8	1.28	2.57	0.07	5.80	2.30	10.74	62.2	15.7	184	687	213	100	C
GW-16	0.86	7.9	0.78	2.22	0.10	5.00	11.40	18.72	53.7	19.5	207	684	161	155	C
GW-17	0.71	7.8	1.58	2.66	0.10	4.60	1.10	8.46	58.7	21.2	189	659	212	129	C
GW-18	0.72	7.9	1.08	1.89	0.07	4.00	2.10	8.06	50.5	10.6	207	668	292	40	C

表 5A-2 全重金属含量および可給態重金属含量

	全重金属含量 (HNO ₃ -HCl 分解)								可給態重金属含量 (DTPA 抽出)							
	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
	mg kg ⁻¹								mg kg ⁻¹							
GW-1	1.90	93.99	40.35	37272	677.8	92.96	47.00	62.22	0.02	BDL	1.59	2.75	8.95	0.44	0.04	0.26
GW-2	1.79	106.7	42.50	39927	606.1	106.67	44.04	56.32	0.01	BDL	1.23	2.37	14.75	0.65	0.01	0.24
GW-3	2.10	94.62	34.52	36871	575.3	89.97	54.75	59.62	0.02	BDL	1.76	3.65	20.72	0.86	0.19	0.45
GW-4	1.78	80.16	27.27	31472	471.4	76.03	47.84	50.28	0.02	BDL	1.72	3.12	7.26	0.54	0.17	0.30
GW-5	1.69	93.65	44.86	28666	629.4	90.18	67.85	66.94	0.02	BDL	1.61	3.30	7.81	0.53	0.23	0.31
GW-6	1.54	98.54	39.14	37265	747.1	96.35	36.81	70.92	0.04	BDL	1.79	3.10	17.14	1.03	0.14	0.62
GW-7	1.60	89.52	42.14	32284	657.5	85.00	60.30	63.19	0.03	BDL	1.79	3.10	14.33	0.90	0.19	0.51
GW-8	1.29	101.0	45.64	31568	667.9	101.17	46.73	55.03	0.01	BDL	1.35	2.82	4.01	0.40	0.09	0.17
GW-9	1.26	94.08	44.13	33404	641.6	90.94	46.64	56.49	0.01	BDL	1.36	2.34	4.54	0.33	0.13	0.22
GW-10	1.16	94.03	44.87	37938	626.9	89.73	37.12	61.56	0.02	BDL	1.62	2.92	5.61	0.42	0.23	0.23
GW-11	1.22	87.67	46.28	36709	605.0	84.64	43.04	64.39	0.03	BDL	2.03	3.50	14.40	0.83	0.39	0.40
GW-12	1.17	98.86	42.89	40933	629.5	93.61	29.77	63.94	0.02	BDL	1.64	3.53	12.52	0.78	0.25	0.53
GW-13	1.02	97.55	41.51	41520	668.7	91.58	13.64	66.95	0.04	BDL	1.63	3.25	6.99	0.58	0.13	0.54
GW-14	0.89	97.28	41.69	37718	678.8	89.46	9.41	62.19	0.02	BDL	1.50	2.68	5.32	0.39	BDL	0.40
GW-15	2.31	100.5	40.76	37597	676.7	94.54	65.23	72.26	0.03	BDL	1.73	3.57	7.71	0.63	0.19	0.37
GW-16	2.38	94.97	41.94	37227	660.8	88.95	58.50	70.22	0.03	BDL	1.93	3.81	9.75	0.81	0.26	0.70
GW-17	2.35	92.73	39.97	41004	640.1	89.77	49.88	70.07	0.03	BDL	1.56	3.19	5.82	0.52	0.42	0.39
GW-18	2.35	108.65	42.85	41834	615.8	108.26	49.28	62.09	0.01	BDL	1.35	2.34	8.25	0.60	0.03	0.16

表 A5-3 地下水灌漑農地の表層土壌における化学的形態別重金属含量

	Cd					Cr					Cu					Fe				
	Exch	Carb	Feo/Mno	OM	Res	Exch	Carb	Feo/Mno	OM	Res	Exch	Carb	Feo/Mno	OM	Res	Exch	Carb	Feo/Mno	OM	Res
	mg kg ⁻¹					mg kg ⁻¹					mg kg ⁻¹					mg kg ⁻¹				
GW-1	BDL	0.34	0.38	0.16	0.34	BDL	0.34	4.26	15.43	76.67	BDL	0.08	11.40	4.08	23.22	BDL	2.34	791	1705	36301
GW-2	0.01	0.52	0.33	0.24	0.33	BDL	0.64	5.20	16.42	89.23	BDL	0.28	11.49	4.39	24.67	BDL	3.32	840	1589	38918
GW-3	0.02	0.61	0.47	BDL	0.36	BDL	0.75	5.06	15.31	77.57	BDL	0.36	11.49	3.82	24.73	BDL	3.89	848	1827	35830
GW-4	0.12	0.64	0.45	0.22	0.37	BDL	0.77	4.77	15.19	78.65	BDL	0.39	11.30	3.91	24.88	BDL	3.93	770	1712	30520
GW-5	0.02	0.71	0.49	0.19	0.33	BDL	0.89	4.92	14.75	71.82	BDL	0.54	10.18	4.05	22.50	BDL	4.57	758	1634	27734
GW-6	BDL	0.68	0.36	0.23	0.46	BDL	0.78	4.45	19.03	87.90	BDL	0.48	12.64	5.39	27.86	BDL	4.35	902	2061	36145
GW-7	0.02	0.59	0.48	0.23	0.38	BDL	0.66	4.15	16.76	81.99	BDL	0.39	11.22	4.68	24.70	BDL	3.70	634	1654	31474
GW-8	BDL	0.75	0.50	0.20	0.32	BDL	0.93	6.19	15.12	82.84	BDL	0.58	11.37	4.07	23.60	BDL	4.69	952	1521	30453
GW-9	0.07	0.70	0.51	BDL	0.32	BDL	0.84	5.52	14.00	74.14	BDL	0.45	9.96	3.79	22.47	BDL	4.34	874	1708	32348
GW-10	BDL	0.79	0.45	BDL	0.36	BDL	0.96	4.78	15.50	78.97	BDL	0.63	11.67	4.06	24.92	BDL	5.06	756	1732	36997
GW-11	0.06	0.56	0.42	0.26	0.37	BDL	0.60	3.89	17.10	75.67	BDL	0.38	12.14	4.45	25.47	BDL	3.67	569	1896	35940
GW-12	0.04	0.74	0.43	0.23	0.39	BDL	0.80	4.63	17.18	85.84	BDL	0.45	12.94	4.63	26.77	BDL	4.77	785	1836	39952
GW-13	0.06	0.78	0.44	0.20	0.41	BDL	0.88	3.87	18.17	84.59	BDL	0.55	12.50	5.11	26.05	BDL	5.10	676	1821	40650
GW-14	0.02	0.79	0.44	BDL	0.37	BDL	0.87	5.51	14.29	78.30	BDL	0.55	10.19	3.67	23.29	BDL	5.75	1,013	1802	36512
GW-15	0.06	0.80	0.46	0.16	0.40	BDL	0.87	4.97	14.48	78.26	BDL	0.50	11.50	3.71	23.89	BDL	5.52	966	1659	36453
GW-16	0.13	0.81	0.51	0.13	0.38	BDL	0.82	4.64	15.33	78.24	0.07	0.51	11.24	4.03	23.94	BDL	5.58	820	1714	36223
GW-17	0.11	0.85	0.47	0.20	0.40	BDL	1.02	4.61	16.76	80.83	0.02	0.59	12.45	4.37	25.53	BDL	5.91	808	1842	39997
GW-18	BDL	0.91	0.48	0.25	0.37	BDL	1.05	6.26	17.41	92.41	BDL	0.63	12.48	4.42	25.46	BDL	6.20	961	1653	40694

表 A5-3 続き

	Mn					Ni					Pb					Zn				
	Exch	Carb	Feo/Mno	OM	Res	Exch	Carb	Feo/Mno	OM	Res	Exch	Carb	Feo/Mno	OM	Res	Exch	Carb	Feo/Mno	OM	Res
	mg kg ⁻¹					mg kg ⁻¹					mg kg ⁻¹					mg kg ⁻¹				
GW-1	1.50	24.6	374.0	94.92	184.5	BDL	1.66	19.14	27.22	27.61	2.27	3.14	23.99	0.66	6.69	BDL	0.30	3.82	8.62	43.85
GW-2	3.55	34.8	351.3	93.63	167.1	BDL	2.46	22.69	33.21	33.82	2.93	5.27	23.3	0.96	3.65	BDL	0.37	3.26	8.51	41.51
GW-3	3.74	34.6	334.7	82.18	180.3	BDL	2.71	20.24	27.97	28.97	3.10	6.39	29.8	0.58	5.79	BDL	0.46	4.51	8.60	44.62
GW-4	1.24	25.6	357.5	84.51	179.7	Trace	2.70	20.01	27.13	29.38	4.08	6.52	28.03	0.84	6.22	BDL	0.42	4.20	8.53	45.62
GW-5	0.29	22.7	360.6	81.70	170.9	BDL	2.92	19.46	26.08	26.18	2.89	7.65	33.78	0.78	6.26	BDL	0.49	4.17	8.39	40.64
GW-6	2.60	32.0	390.6	155.7	228.7	BDL	3.08	20.72	34.10	32.83	3.00	7.32	13.02	0.87	9.01	BDL	0.65	4.94	11.56	54.82
GW-7	2.32	30.3	399.6	106.6	202.1	BDL	2.57	19.19	29.13	29.11	3.28	6.09	28.76	0.98	7.92	BDL	0.49	4.71	10.30	46.72
GW-8	BDL	24.1	387.3	85.17	170.5	BDL	3.18	23.90	29.23	30.87	3.62	8.38	33.26	0.86	5.06	BDL	0.43	3.62	7.85	39.35
GW-9	0.20	23.2	394.4	81.74	168.6	BDL	2.91	20.55	25.86	27.48	5.14	7.54	31.75	0.49	5.13	BDL	0.42	3.87	7.89	39.29
GW-10	0.14	21.5	374.8	90.56	188.6	BDL	3.27	19.64	27.70	29.85	3.12	8.84	26.73	0.58	6.41	BDL	0.51	3.75	8.63	45.80
GW-11	2.28	31.1	330.1	89.34	191.2	BDL	2.57	17.71	28.80	28.20	4.48	5.61	31.06	1.07	6.70	BDL	0.56	4.31	9.54	48.74
GW-12	3.27	34.9	336.7	100.2	198.6	BDL	3.14	20.13	32.00	31.54	5.86	7.89	23.54	0.97	7.90	BDL	0.57	4.48	9.67	47.96
GW-13	1.91	31.1	392.2	123.0	206.9	BDL	3.45	21.16	32.54	30.29	6.47	8.71	20.05	0.80	7.95	BDL	0.73	5.04	11.23	49.86
GW-14	0.60	27.1	395.4	94.74	186.3	BDL	3.41	21.12	25.92	27.99	5.94	9.08	22.25	0.36	6.80	BDL	0.63	4.96	8.61	42.74
GW-15	0.49	24.4	417.0	102.8	189.6	BDL	3.32	20.84	27.10	28.51	6.54	9.25	22.98	0.60	7.90	BDL	0.53	4.52	8.53	44.24
GW-16	0.94	28.0	383.8	90.45	189.5	Trace	3.32	19.38	27.30	28.01	9.49	9.63	32.79	0.60	7.62	BDL	0.58	5.03	9.00	43.96
GW-17	1.34	27.8	399.6	110.0	201.9	BDL	3.63	20.58	29.64	30.16	BDL	10.30	22.47	0.78	7.38	BDL	0.67	4.79	9.97	49.35
GW-18	0.67	26.4	409.8	104.1	183.8	BDL	4.05	23.74	37.15	35.01	BDL	11.14	26.54	1.05	6.41	BDL	0.50	3.00	8.63	41.49

表 A5-4 地下水灌漑農地の表層土壌における選択溶解法による化学的形態別重金属含量

	Cd				Cr				Cu				Fe			
	RRO	Amor1	Amor2	Cry	RRO	Amor1	Amor2	Cry	RRO	Amor1	Amor2	Cry	RRO	Amor1	Amor2	Cry
	mg kg ⁻¹				mg kg ⁻¹				mg kg ⁻¹				mg kg ⁻¹			
GW-1	0.57	0.35	0.43	0.56	1.33	4.26	1.19	46.85	1.12	11.40	8.78	19.82	299	795	685	14309
GW-2	0.57	0.30	0.51	0.60	1.45	5.20	1.70	57.47	1.05	11.49	6.45	19.26	339	844	849	15091
GW-3	0.59	0.44	0.30	0.73	1.46	5.06	1.76	50.3	1.13	11.49	7.19	21.96	313	852	863	18731
GW-4	0.61	0.42	0.38	0.62	1.40	4.77	1.39	48.1	1.18	11.30	9.56	20.99	266	774	712	15639
GW-5	0.65	0.46	0.25	0.82	1.51	4.92	1.35	46.28	1.30	10.18	6.84	23.28	286	762	682	18913
GW-6	0.50	0.33	0.38	0.54	1.17	4.45	1.42	46.46	0.91	12.64	8.03	17.13	268	906	775	10474
GW-7	0.64	0.45	0.30	0.77	1.44	4.15	1.58	47.91	1.19	11.22	8.45	22.75	251	638	769	19394
GW-8	0.62	0.47	0.30	0.70	1.50	6.19	1.70	54.80	1.35	11.37	5.54	21.83	350	956	792	18318
GW-9	0.64	0.48	0.25	0.73	1.48	5.52	1.61	49.20	1.47	9.96	6.07	21.83	317	878	797	19071
GW-10	0.61	0.42	0.42	0.52	1.43	4.78	1.79	45.88	1.30	11.67	10.58	18.68	308	760	913	13116
GW-11	0.66	0.39	0.28	0.80	1.47	3.89	1.22	43.64	1.55	12.14	7.89	23.66	248	572	703	17917
GW-12	0.45	0.40	0.30	0.81	1.16	4.63	1.78	51.76	1.00	12.94	5.93	22.64	269	789	900	20986
GW-13	0.41	0.42	0.24	0.62	1.04	3.87	1.89	48.34	0.93	12.50	6.47	22.54	249	679	890	16850
GW-14	0.47	0.42	0.25	0.62	1.14	5.51	1.22	54.16	1.00	10.19	4.95	22.36	292	1017	694	18205
GW-15	0.59	0.43	0.32	0.58	1.32	4.97	1.48	52.25	1.14	11.50	6.03	20.03	306	970	793	14168
GW-16	0.56	0.48	0.29	0.69	1.34	4.64	1.55	48.08	1.15	11.24	6.86	22.50	349	824	854	19029
GW-17	0.54	0.44	0.31	0.66	1.32	4.61	1.65	48.04	1.13	12.45	7.26	21.48	309	812	842	16894
GW-18	0.60	0.45	0.35	0.47	1.43	6.26	1.53	62.05	1.30	12.48	4.51	18.78	380	965	767	14500

表 A5-4 続き

	Mn				Ni				Pb				Zn			
	RRO	Amor1	Amor2	Cry	RRO	Amor1	Amor2	Cry	RRO	Amor1	Amor2	Cry	RRO	Amor1	Amor2	Cry
	mg kg ⁻¹				mg kg ⁻¹				mg kg ⁻¹				mg kg ⁻¹			
GW-1	332	374	416	314	6.93	19.63	10.57	25.32	22.61	23.99	BDL	6.41	1.24	3.82	0.33	12.98
GW-2	308	351	393	273	8.12	23.18	14.03	30.98	22.93	23.35	0.50	9.99	1.12	3.26	0.49	12.57
GW-3	289	335	378	287	6.42	20.74	11.19	30.89	24.10	29.79	2.25	9.44	1.33	4.51	1.96	18.16
GW-4	304	358	384	284	6.41	20.51	10.31	27.98	25.03	28.03	2.18	9.51	1.30	4.20	1.24	14.44
GW-5	319	361	388	306	6.77	19.95	10.57	35.76	27.52	33.78	2.00	10.46	1.26	4.17	1.85	19.54
GW-6	316	391	449	390	5.79	21.22	11.06	20.09	13.47	13.02	0.28	8.50	1.67	4.94	2.25	11.57
GW-7	325	400	410	335	6.47	19.67	10.98	33.51	25.63	28.76	1.36	11.38	1.72	4.71	3.14	19.51
GW-8	345	387	422	326	9.64	24.38	13.95	37.48	25.56	33.26	2.37	10.81	1.03	3.62	0.28	14.95
GW-9	331	394	435	324	7.45	21.04	12.14	33.31	27.82	31.75	2.38	10.94	1.26	3.87	BDL	17.13
GW-10	324	375	494	301	7.00	20.13	13.48	23.93	23.03	26.73	0.54	10.23	1.14	3.75	1.10	12.04
GW-11	293	330	364	292	5.88	18.20	9.91	33.13	27.74	31.06	BDL	10.55	1.84	4.31	0.63	18.89
GW-12	267	337	367	332	5.68	20.63	10.79	37.19	18.81	23.54	3.18	11.14	1.30	4.48	2.05	19.54
GW-13	296	392	435	383	5.69	21.64	12.47	31.17	15.04	20.05	1.31	11.02	1.51	5.04	2.15	17.13
GW-14	325	395	435	373	6.86	21.62	12.18	29.93	18.17	22.25	BDL	10.20	1.27	4.96	0.79	16.06
GW-15	355	417	421	375	7.15	21.32	11.85	27.17	19.71	22.98	2.44	10.20	1.30	4.52	1.17	14.16
GW-16	313	384	415	361	6.24	19.86	11.56	32.77	22.92	32.79	1.67	10.17	1.49	5.03	2.00	23.64
GW-17	321	400	439	370	6.64	21.07	11.28	30.81	20.16	22.47	2.62	9.75	1.43	4.79	1.78	16.82
GW-18	335	410	428	293	8.71	24.22	12.96	28.74	22.07	26.54	0.99	7.85	1.00	3.00	BDL	10.96

*RRO は室温塩酸ヒドロキシルアミン溶解法, Amor1 は加熱塩酸ヒドロキシルアミン溶解法, Amor2 は酸性シュウ酸性アンモニウム溶解法および Cry は酸性シュウ酸性アンモニウム-アスコルビン酸溶解法による。

付表 6 シリア国アレppo近郊地域・都市下水灌漑農地の植物体の理化学性

	収量		子実全重金属含量 ^a						子実全重金属含量 ^a					
	子実 t ha ⁻¹	茎葉	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
			mg kg ⁻¹						mg kg ⁻¹					
Up-1	8.4	8.9	0.124	0.29	6.15	0.62	BDL ^b	35.9	0.78	2.48	12.91	6.49	6.71	10.92
Up-2	8.2	8.1	0.152	0.19	6.76	1.00	1.20	35.5	0.86	0.10	14.33	7.15	135.55	10.19
Up-3	6.6	4.6	0.129	0.19	7.12	1.02	1.87	45.5	0.98	0.19	16.16	8.33	37.69	14.02
Up-4	8.9	10.4	0.139	0.34	6.75	1.49	BDL	33.3	0.92	Tr.	15.27	7.81	1.22	9.73
Up-5	9.5	11.0	0.130	0.62	7.51	1.90	0.35	29.9	0.99	0.04	16.86	8.46	1.19	9.59
Up-6	7.7	8.1	0.142	0.59	6.83	1.15	BDL	39.8	0.93	0.04	15.41	7.91	2.98	8.39
Mid-1	6.7	8.6	0.159	0.25	6.87	1.15	BDL	35.3	0.41	1.44	7.37	3.64	0.15	6.75
Mid-2	9.1	8.4	0.150	0.26	5.51	0.96	0.05	20.8	0.60	2.05	10.12	5.31	0.32	4.13
Mid-3	8.7	7.1	0.165	0.31	6.29	1.00	BDL	25.5	0.85	2.36	13.85	6.12	0.12	4.73
Mid-4	8.2	8.5	0.117	0.18	5.37	0.73	BDL	29.8	0.59	1.86	9.90	5.14	0.12	4.81
Mid-5	8.8	7.6	0.133	0.19	5.37	0.70	BDL	23.9	0.59	1.85	9.73	5.08	0.09	3.66
Mid-6	10.2	9.4	0.117	0.32	4.90	0.46	0.01	27.6	0.72	2.19	11.53	6.13	0.09	5.22
Down-1	6.7	7.7	0.146	0.24	6.12	0.97	BDL	20.3	0.05	0.31	2.34	0.51	0.10	2.57
Down-2	7.9	6.9	0.179	0.36	6.03	1.19	BDL	16.2	0.07	0.44	2.07	0.73	0.19	2.19
Down-3	7.7	6.1	0.195	0.33	6.11	1.22	BDL	21.4	0.09	0.52	2.47	0.92	BDL	2.82
Down-4	6.9	8.5	0.146	0.22	4.31	0.89	BDL	17.4	0.12	0.55	2.72	1.15	0.04	2.69
Down-5	8.2	8.4	0.154	0.30	5.29	1.14	BDL	21.1	0.21	0.96	4.26	2.03	0.04	4.11
Down-6	7.3	6.8	0.123	0.33	5.35	1.04	BDL	21.7	0.23	0.86	4.55	2.01	0.08	3.48

^a HNO₃—HClO₄ 分解, ^b 検出限界以下

謝辞

本研究を遂行するにあたり，鳥取大学農学部山本定博教授には，終始懇切丁寧なご指導，ご鞭撻およびご援助を賜り，深く感謝申し上げます．国連大学水・環境・保健研究所，国際乾燥地農業研究所，国際水管理研究所 Manzoor Qadir 上席研究員には，研究の着想および進め方等において，多大なご尽力を頂き，心から感謝申し上げます．鳥取大学農学部遠藤常嘉准教授には研究者の在り方並びに研究をまとめるにあたり，多大なご助言およびご協力並びに叱咤激励を頂き，深く感謝申し上げます．また，本論文をとりまとめるにあたり，島根大学増永二之教授，鳥取大学農学部藤山英保教授に謹んで感謝の意を表します．

第 2 章世界および地域における都市下水の現状を取りまとめるのに対し，グローバル COE プログラム「乾燥地科学拠点の世界展開」における支援の基，データを取りまとめました．また，ハザラ (Hazara) 大学農学部 Zahoor Ahamad 助教には貴重なご助言を賜りました．また，二人の査読者からのご意見およびご助言により，考察をより深めることが出来ました．各国の統計局の皆様には貴重な資料のご提供並びに適切なご助言を賜りました．第 3 章世界の都市下水の推定をまとめるにあたり，鳥取大学農学部北村義信教授には貴重なご助言およびご協力を頂きました．第 4 章シリア国における長期間の都市下水灌漑農地の環境影響評価は，ITP プログラム，GCOE プログラム「乾燥地科学拠点の世界展開」，独立行政法人日本学術支援機構による若手研究者インターナショナルトレーニングプログラム「乾燥地における統合的資源管理のための人材育成」プログラムおよび国際連合大学，中国科学院寒区旱区環境工学研究所，乾燥地研究所，チェニジア国立農業研究所，国際乾燥地研究センターおよび鳥取大学の共同運営されている「乾燥地における統合的管理に関する共同修士号プログラム」の支援のもと現地調査および分析を行いました．国際乾燥地農業研究所 Theibe Oweis 博士および乾燥地研究センター恒川篤志所長のリーダーシップなしには研究を行うことができませんでした．国際乾燥地農業研究所 Piere Hayek 氏および George Estefan 氏のご協力の基，試料採取および分析を遂行できました．また，シリア国滞在中の御手配頂きました Lauris Majid 氏および Affif Dakermaniji 氏に感謝申し上げます．また，国際乾燥地農業研究所，鳥取大学および独立行政法人日本学術支援機構の関係皆様にこの場をお借りして，御礼申し上げます．筆者が在学中に鳥取大学農学部環境土壌学研究室（旧土壌学研究室）および乾燥地環境資源学研究室の学生諸氏には多大なご協力及び多くのご助言を頂き，深く感謝申し上げます．

学会誌公表論文リスト

佐藤敏雄, 山本定博, Manzoor Qadir, 遠藤常嘉, 増永二之, 北村義信. 2013. 世界の都市下水生成量および処理量の推定. 水利科学 受理
第3章の一部に相当

Toshio Sato, Sadahiro Yamamoto, Manzoor Qadir, Tsuneyoshi Endo, Tsugiyuki Masunaga and Zahoor Ahmad. XX. Long-term effects of wastewater irrigation on soil heavy metal contamination in peri-urban areas of Aleppo, Syria. (in press)
第4章の一部に相当

参考文献

- Manzoor Qadir, Akissa Bahri, Toshio Sato, Esmat Al-Karadsheh, 2010. Wastewater production, treatment, and irrigation in Middle East and North Africa. *Irrigation and Drainage Systems* 24 Combined 1-2 :37–51 (June 2010)
- Maite Guardiola-Claramonte, Toshio Sato , Redouane Choukr-Allah, Manzoor Qadir. 2012. Wastewater Production, Treatment and Reuse Around the Mediterranean Region: Current Status and Main Drivers. In: *R. Choukr-Allah et al. (eds.), Integrated Water Resources Management in the Mediterranean Region: Dialogue Towards New Strategy*, Springer Dordrecht-Heidelberg-New York-London, pp.139–174 (August, 2012)
- Toshio Sato, Manzoor Qadir, Sadahiro Yamamoto, Tsuneyoshi Endo, Ahmad Zahoor. 2013. Global, regional, and country level need for data on wastewater generation, treatment, and use. *Agricultural Water Management* 130: 1–13 (December 2013)