

2002年度修士論文

乾燥地における水資源と環境保全
ヨルダンにおける自然循環式水処理と
再生水利用計画

2003年1月

指導教員 村上雅博

高知工科大学大学院基盤工学専攻

社会基盤工学コース 1055153

濱津 陽一

要旨

乾燥地における水資源と環境保全 - ヨルダンにおける自然循環式水処理と 再生水利用計画 -

高知工科大学大学院 濱津陽一

1. はじめに

現在砂漠・半砂漠地帯では十分な汚水処理がなされていない為に、環境汚染が問題となっている。水不足問題は周辺環境へ重大な問題を引き起こすだけでなく、安全な上水を確保するのにも深刻な影響を及ぼす可能性が有る事が分かった。また、今後の水需要の増大と、新たな水資源開発が望めない今、水不足が社会不安を煽る大きな要因となっており、早急な対策が必要で有る。今後の水不足問題を解決するにあたり持続可能な水資源管理と開発、国内需要の高い農業用水を従来型の水源に頼らず、処理水を転用利用する事が乾燥地域で必要だと考える。また、それらの国々の大部分は発展途上国で、高度な浄化施設を建設・維持管理するのは困難な状況である。そこで本論では、現地で入手可能であり安価で、循環再利用できる材料を使用したエコロジカルな汚水処理の手法について検討した。

固形廃棄物の汚水処理への循環再生利用の試みは今まで多くなされているが、今回は使用済みペットボトル・ガラス瓶を原材料にした中空チューブ・発泡骨材を接触ろ材に使用した。また発泡骨材には廃棄された貝殻も混ぜいれてある。本来これらの製品はアスファルトの透水材などとして開発されたものだが、多孔質であり表面積が大きいという性質から、下水処理水の高度処理に効果を発揮するのではないかと考え、高知工科大学の下水処理施設を利用して実験を行った。また、実験で用いた新接触ろ材の処理水で、乾燥地での灌漑用水転用による節水効果と環境保全があるのかについて可能性の検討も行った。

2. 実験

2.1 実験概要

実験は、高知工科大学下水処理システムの2次処理水を中空チューブ・発泡骨材を用いたフィルターで、透過時間を一定にしてろ過する。2次処

理水と実験で得られた浄化水のそれぞれを水質測定する。測定結果を比較し、接触ろ材と滞留時間による依存性の水質浄化能力を明らかにする。

2.2 実験装置

2.2.1 装置概要

実験装置の全体図を Fig.1 に示す。各装置の詳細は以下の通りであり、装置は全て市販されている材料を加工し製作した。

2.2 実験方法

上記で述べた実験装置に中空チューブを (Fig. 2,3 参照) と発泡骨材 (アコヤ貝殻 5%・10%含有。以後、5%発泡骨材・10%発泡骨材) の3種類を別個にフィルターろ材とした。ろ材はそれぞれのフィルターに詰め、2次処理水を定期間隔で透過させ、透過前・透過後の成分変化を測定した。なお、高知工科大学では回遊式間欠曝気浄化槽を用いた2次下水処理システムを導入しており、本実験ではこの2次処理水を原水として使用した。透過時間は1・2・3・4・5・6・7・8・9(時間)とし、測定された中空チューブ・発泡骨材(5%・10%)の有効空隙率は中空チューブが高い値であり、あとはほぼ同じ値である (Table.1 参照)。また測定水質項目として BOD, COD, 全窒素(TN)の数値を測定した。

Table.1 各ろ材の有効空隙率

各ろ材	有効空隙率 (%)
中空チューブ	50.79
5%発泡骨材	50.71
10%発泡骨材	50.19

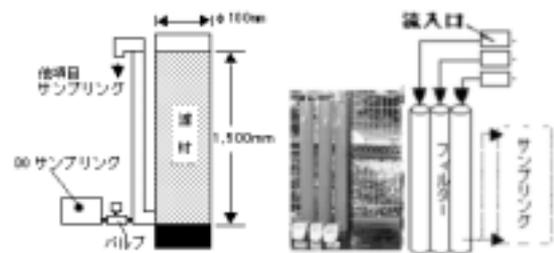


Fig. 1, 実験装置全体とフィルター図



Fig 2 発泡骨材



Fig 3 中空チューブ

3. 実験

3.1 実験結果について

今回の実験は2002年3月20日に高知工科大学内下水処理施設において10:00~19:00の間に採取したデータに基づき分析した結果である。天候は快晴、処理水の水温は21であった。なお全てのサンプリングには高知工科大学の二次処理水を使用し、全て同じ所からサンプリングした。流入時の各値はTable 2に示す。

Table 2 流入時の値

Inflow	mg・l ⁻¹
COD	26
BOD	7.67
TN(全窒素)	28.2
TP(全リン)	11.5

3.2 材料別の浄化能力

各ろ材別、浄化能力を分析した結果 (Table 3, 4, 5 参照) 次の事がわかった。中空チューブ、5%発泡骨材、10%発泡骨材の全窒素の値は、中空チューブ以外は大体3時間経過した後に低下を見せている。どのろ材も最も透過時間が長い9時間が最も効果があった。また、全窒素の除去率が一番高かったのは10%発泡骨材であった。またリンについて大きな除去効果があり、吸着・もしくは化学・生物学的作用による除去・吸着反応があったと推測される。

Table 3,4,5 各ろ材除去性能

Item(中空)	BOD	COD	T-N	T-P
	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)
Influent	7.67	26	28.2	11.5
Effluent	5.22	6.8	6.4	7.3
Rejection rate (%)	31.9	73.8	77.3	36.5

Item(5%)	BOD	COD	T-N	T-P
	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)
Influent	7.67	26	28.2	11.5
Effluent	5.10	14.4	8.0	3.1
Rejection rate (%)	33.5	44.6	71.6	73.0

Item(10%)	BOD	COD	T-N	T-P
	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)
Influent	7.67	26	28.2	11.5
Effluent	2.39	22	15.1	4.5
Rejection rate (%)	68.8	15.4	46.5	60.9

3.3 考察

今回の実験では各項目の浄化過程解明にはいかなかったが、浄化性能を有する事は分かった。リンに関しては、全く予想外の好結果が得られた。BODに関しては期待していたような浄化効果があまり見られなかった事から、C/Nとの相関性と、微生物定着までの時間を把握する必要がある。それに加え接触ろ材の耐久時間や、滞留時間9時間では浄化能力の限界は見てこなかった事から、滞留時間延長による浄化能力の把握が必要である。また、今後この接触ろ材はA O法のような、嫌気・好気状態を繰り返す処理に有用なろ材としての可能性が見えてきた。リン除去にかんしては、発泡骨材は大変に有用な性能をみせた事から、今後エコロジカルなリン除去システムとして大変に有効な接触ろ材としての可能性がみえた。

3.4 まとめ

本論は主に乾燥地域での水質浄化が最終目的だったのだが、極めて有用なリン除去性能が見られた事から、今後さらに幅広い利用用途も予想される。発泡骨材によるリン除去性能は旧来までの科学的・電氣的な吸着手法より安価で行える事から、除去性能を向上出来れば、大変有効な手法となりえる。またこの結果から流入水をヨルダンの二次処理水を利用したとしても、処理後の水は灌漑用水に転用可能な水質になる事が分かった。

4 再生水利用計画

処理水を農業や工業に転用する事は、乾燥地帯で、極めて重要なテーマである。ケースとして、本論ではヨルダンを取り上げた。ヨルダンでは生活用水に適している淡水(循環・非循環地下水、表流水)の70%近い水量を農業に利用している。灌漑用水の水源は主に、表流水、地下水、処理水である。1999年では総供給量の521MCMのうち、表流水が37%、地下水が49%、処理水が14%を占めていた。今後の地下水及び表流水を生活用水として転用していかなければならない事を考えると、処理水の積極的利用が必要となる。また、今後の生活用水の増大に併せて問題なのは、北部エリアの農業用水の実態である。高原地帯が多い北部エリアでは、地下水による灌漑が多くなされており、過剰揚水による地下水の地下水位低下、枯渇、水質悪化の問題が深刻化している。しかし、ヨルダンにおいてこれ以上農業用水を削減する

事も出来ないのが現状である。現況をふまえ、北部エリア（高原地帯）からヨルダン渓谷への農地の転用による、地下水源の保全と節水、それに併せて実験で行った処理技術導入の可能性の追求がこの章の目的である。

4.1 ヨルダンの処理場の概要と処理水の利用状況

ヨルダンでは多くの污水处理場が処理水の再利用を進めている。実際にはどのような処理場があり、どのような方法で処理が行われ、どのような再利用がなされているのだろうか。2001年時点で、ヨルダンには19箇所の下水処理施設が稼働している。首都アンマン周辺地域をカバーするのはアッサムラ処理場を含む6つの処理場で、ラグーン方式(安定地方式)の処理形態がとられている。通称天日干しシステムと呼ばれるこの処理は、嫌気性池、好気性池、熟性池からなる広い土地と、太陽光を利用したヨルダンの気候風土に適した処理である。また、高度な技術を必要としないため、古くから導入されていた方式である。ワジエシールという下水処理場では、土地確保ができなかった為に、好気性池の代わりに人工的に暴気処理を行っている。その他の10箇所の処理場では活性汚泥法等の処理を組合せた集中処理を行っている。都市部の污水处理はアッサムラ下水処理場で行っているが、流入量の増加が問題となっている。

4.2 下水処理水の灌漑用水利用に関する条件

以下の条件はいくつかの条件をつける事により、灌漑用水への利用を安全かつ積極的に行えるのではないかと考えた、作成したものである。

- 1) 水処理場と処理水を利用している地域の地形的条件
- 2) 灌漑用水と処理水のコスト
- 3) 農業に使用できる処理水の塩分濃度レベル
- 4) 処理水中の大腸菌数
- 5) 污水处理場から排出される処理水のレベル
- 6) 下水処理場から近くに適切な灌漑用地がある
- 7) 下水発生量が多い

4.3 適地選定

アッサムラの現在の水質は決して良いものではなく、処理水が河川を汚している事は確かである、河川に流入する前に、水質改善しなければ、灌漑用水利用の前に周辺環境の汚染や、地下水汚

染につながってしまう危険性もある。しかし、流入量と運搬コストの問題はクリアした。十分な灌漑用水を確保するにはアッサムラの処理水を転用することが、地下水の大替水源として望ましいと考える。

3.5 下水処理水再利用案

下水処理水の再利用の課題は、水質問題の他に、送水費用が問題であり、これは処理水の料金に反映されてしまうために、最も重要と考えられる。首都圏からの下水処理は自然流下による送水が可能なヨルダン渓谷での再利用が望ましい。

新たな接触ろ材を使用した場合、ヨルダン渓谷に流れ混む King Talal River の水質から考えて BOD で $2 \sim 5 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 、TN で $6 \sim 15 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 、TP では最低でも $7.3 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 未満の除去率は期待できることから、十分に農業用水として転用可能であるため、下水処理水の再利用にあたって農家にアピールしていくことも必要だと考える。実際に処理水を転用するならば、健康上きわめて危険な事項も多くある。塩素殺菌されたものでも、スプリンクラー方式などの灌漑ではなく、マルチとドリッピングを併用したものにより、節水にもつながる事がわかった。

3.6 まとめ

直接高原地帯での地下水揚水の削減にはつながらないものの、施設の導入と処理水利用が可能である事はわかった。農作物と農業形態により、処理水転用が出来ないものもあるので、農業地域と作物の分布の把握が必要である。農業用水が安く、処理水を普及させるには、コストの問題をクリアする必要がある。

3.7 今後の課題

ヨルダン渓谷で、実際に処理水転用により、どのくらい高原地帯での地下水揚水の削減ができるかは、不明な点が多い。今後は、実際にどのくらいの節水効果があるのかの検討をしていきたい。

接触ろ材を用いた処理にも不明な点が多く、実際に高負荷に耐えられるものなのか、耐用年数がどれほどなのかも不明であり、今後はそれらの問題を解決し、実際にヨルダンでの下水処理施設になりうるかについても、見当していきたい。

**Conservation of water resources and water environment in the arid region.
-A case study on the natural circulation wastewater for reclamation of treated
wastewater in Jordan-**

YOICHI Hamatsu

The country of Jordan is mainly semi-arid region. For example, an annual rainfall of Jordan is 200mm, 92% of rainfall evaporates, 5% become ground water and 3% become surface water runoff. Therefore the water resources, which are available, are restricted to easily accessible ground, recycled wastewater and surface water. Moreover wastewater is not clean adequately to use again.

This study aims to propose a method for conservation of water resources and water environment in the semi-arid region based on the case study of the natural circulation wastewater for reclamation of treated wastewater in Jordan. Accordingly the method that is low cost, easy technology, simple method, high efficiency, easy maintenance and efficient biological treatment systems was proposed in this thesis.

Experiment of wastewater treatment were carried out using contact filter made from recycled PET bottle and discarded glass which are easy to get in arid region.

As a result of the experiment, effect of eliminating organic materials from experimental wastewater was confirmed in foaming aggregate. Specifically BOD, TN and TP were eliminated 68.8%, 77.3% and 73.0% each. From this result, wastewater that was treated by using foaming aggregate can be reused for irrigation. The following study was done to select an area where wastewater reuses. Water quality and rate of treated wastewater including costs of water pumping should be considered to reuse treated wastewater.

Using spontaneous water flow for wastewater treatment plant has the following merits.

- (1) Building cost of wastewater treatment plant is lower than using other method.
- (2) Energy charge of operating plants is lower than using other method.
- (3) Plant can be build by simple technology.
- (4) Maintenance of Plant is not used so often.

Consequently Jordan valley was selected to experimental place.

Hereafter improvement of capacity of contact filter to treat wastewater and way of establish the plant practically will be studied for realization of reusing treated wastewater.

乾燥地域における水資源と環境保全

1 研究の背景と目的	7
1.1 中東・日本におけるヨルダンの重要性	7
1.2 ヨルダンの水資源	8
1.3 水需要の増大と、汚水処理の問題	9
1.4 水不足がもたらす環境への影響	13
1.5 研究目的	15
1.6 研究方法	15
2 自然循環式水処理実験	16
2.1 実験	16
2.1.1 接触ろ材の組成	17
2.1.2 各ろ材の浄化特性	18
2.2 実験結果	18
2.3 考察	20
2.4 まとめ	21
3 再生水利用による水資源と環境保全	22
3.1 ヨルダンの処理場の概要と処理水の利用状況	23
3.2 下水処理水の灌漑用水利用に関する条件	29
3.3 適地選定	30
3.4 アッサムラ下水処理場の現状と、ヨルダン渓谷の農業	31
3.5 下水処理水再利用案	35
3.6 考察	35
3.7 まとめ	36
謝辞	37
引用・参考文献一覧	38
Appendix	39

1 研究の背景と目的

1.1 中東・日本におけるヨルダンの重要性

ヨルダンの中東和平の直接当事国として、パレスチナ問題の取り組みとも密接に関わっており、和平問題において極めて特殊な立場に置かれている。地理的には東はイラクと国境を接し、西はイスラエル・パレスチナ問題で重要な鍵となるヨルダン川西岸がヨルダン川を挟み西に展開している。ペルシャ湾地域と東地中海地域とを結ぶ結節点に位置しており、周辺国や地域経済との関係上でも重要な位置にある。また北はシリア、南はサウジアラビと国境を接しており、北部にあるゴラン高原ではイスラエルとシリアは今も戦争下にある。それに加えてヨルダン、イスラエル、パレスチナ地域、シリアは周辺諸外国と比べても深刻な水不足問題を抱えており、今後、必要な量と質の両面における水資源確保を巡る抗争が中東地域の国際的緊張を生む要因となる。ヨルダンが政治的・社会的に安定し、経済的にも安定する事は、中東問題（パレスチナ・イスラエル問題）の解決と中東全域の安定と安全を確立する上で極めて重要である。また、日本輸入石油の約8割を中東アジア（湾岸地域）に依存している事を考えると、日本にとっても、中東の政治安定は重要な問題である。

しかし、上記したようにヨルダンは中東において水資源が最も貧しい国であり、今後難民流入や自然人口増加も加わり、ヨルダンでの社会不安に大きく影響を及ぼしている。現時点での生活用水の不足は当然の事ながら、農業においても水資源量が限られている為に、主食である小麦の自給率が低下し大きな問題になっている。現在は輸入により小麦を確保しているが、人口増加による消費量の増加や周辺国との社会情勢に加え、食糧安全保障面においても、自国での小麦の生産量増加が急務である。また、生産量が少ないという事は当然 GDP 比率、就業人口比率ともに低く国内 GNP 低下に繋がる悪循環と繋がっている。また、ヨルダンの鉱業であるリン・カリウムの生産と、その関連産業では、主要産業といえども、大きな利益を上げるまでにはいたっていない。今後は国を挙げて産業育成と人材開発を行わなければならない。外貨獲得の上で現在最も重要な位置を占めている観光産業は、今後も伸び率が期待されるが、中東情勢の影響を受け、観光客数が激減している。観光産業には施設整備も重要なのだが、設備投資の資金も不足している事が悪循環となっている。水資源については、絶対量の不足はもとより、経営、利用の非効率性や、上下水道施設の維持管理の不備が問題となっている。上水では約50%が用途不明水となっている事を考えると今後も社会基盤整備と上水の整備が重要な課題である。またそれと同時に水使用量の増加を考えると安定した水供給を行う為に、新たな手法による自然環境に配慮した持続可能な水資源開発が重要になっている。それに加え、ヨルダン国内では十分な污水处理がされているとは言い難い状況に有る。この事により、広く処理水再利用が出来ないばかりか、地下水と周囲の環境汚染にも繋がる重大な問題をはらんでいる。今まで述べてきたように、ヨルダンは水使用量が増加の一途をたどっている。それは、同時に汚水の増加を意味し現在のヨルダンでは設計値より大幅な汚水流入により、十分な処理が成されていない地域が多くある。国内での水使用量の増大に合わせた污水处理問題の解決が急務である。

1.2 ヨルダンの水資源

本節ではヨルダンの水需要がどうなっているのか、把握していく。ヨルダンは水資源賦存量からみると世界ワースト2位であり、深刻な状況だといえる（参照: Table 1.2.1）。中東和平の観点からみても紛争の原因と考えられる水問題解決は大切問題である。

このような国になってしまった理由として大きく分けて、自然的要因と人為的要因の2つの要因からなると考えられる。一般的に乾燥地化が進む地域では、これらの要因が最も大きな原因とされ、異常気象による気候変動や、井戸の過剰揚水等が原因とされている。これらの原因に加え、さらにヨルダンは、その気候特性から降水量も年間約200mm以下の年も多くあり、降雨のうち約92%が蒸発により使用出来ないという過酷な条件下に置かれている。また、人為的要因としては、ヨルダン川の問題が大きな原因と言える。ヨルダンの真水の大部分は、ヨルダン川から得られるものが多かった。1967年にイスラエルとの6日戦争が起こる前、ヨルダンはWest bank（ヨルダン川西岸地区）を管理していた。ヨルダンとWest bankは、この地域の地下泉や帯水層から揚水し、灌漑・生活用水として利用してきた。敗北後、ヨルダンはこの貴重な水源および耕地の半分を失う事になった。つまり、様々な要因によりヨルダンが世界で稀に見る水の少ない国となってしまった。つまり、ヨルダンの最大の問題は降水量が少ない事と、自国が自由に利用できる川・湖沼がなく、地下水源に頼り切っている事である。その地下水源については、無計画に掘られた井戸からの過剰揚水と、現在も使用され続けている不法な井戸の使用により、全国各地で地下水位の低下を招いている。また、ヨルダンでは、十分な污水处理がなされているとは言い難い状況であり、汚染されている処理水が河川に流出されている事を考えると、重要な地下水源の水質汚染が予想される。

今後のヨルダンの水問題と水環境問題の解決の糸口としては、従来からの表流水、イスラエルからの条約水、循環・非循環型の地下水の利用に加え、これまで使用されていなかった逆浸透膜を使用した海水淡水化等の新技術による新たな水資源開発と、下水処理水の積極的な循環再利用が考えられる。

Table 1.2.1 水資源賦存量

順位	国名	人口 (百万人)	水資源賦存量 (m ³ /year/人)
1	ジブチ	0.69	14
2	ヨルダン	456	207
3	イエメン	18.12	287
4	シンガポール	3.59	346
5	チュニジア	9.84	443
6	カーボヴェルデ	0.44	455
7	ケニア	30.34	495
8	ブルンジ	6.97	516
9	アルジェリア	31.60	544
10	オマーン	2.72	709

2000年現在
* 現代用語の基礎知識 2003

1.3 水需要の増大と、汚水処理の問題

現在、ヨルダンは2000年時点で人口約456万人(難民やヴェドウィンと言われる放牧民族もいる為に、正確な把握はされていない)と言われ、大量の難民流入や自然増加により今後25年以内に約2倍に人口が増加すると予測されており、現在の水資源量から考えると、水の確保が更に困難な状況になると言える。更に人口の半分以上が首都アンマン(約200万人)に集中し、都市用水の確保は急務となっている。また、観光産業には十分な水の確保は重要な問題であり、観光開発が進むにつれ、水使用量の増加(参照: Fig 1.3.1)は明らかである。それに加え、住民の水に対する関心が無い事も問題である。アンマン市内では漏水が激しく、給水(継続的な断水状態なので、週に1,2度の給水があり、屋根の上のタンクに貯水)が行われた後は、よく水が漏れていることがある(参照: Fig 1.3.2)。原因は、起伏が激しいために高圧力で給水するために配水管がもたないからである。また水圧低下により水がこなくても、給水車サービスにより水を得る事が出来る事から、住民の意識としては水があるように錯覚しているという事もこの問題に拍車をかけているといえる。住民が漏水に気づいたとしても、通報することなく利用したり、垂れ流しにしたりしているといった問題は、今後モラルや教育によって改善されるべき問題である。また、他人の家の配水管からの盗水や、水道管に穴をあけて農業用水にするといった事も日常的に行われている。これらの問題も、人口増加と共に増大している。政府は住民の不法な水利用の対策をしているが、アンダーグラウンド化しつつあり、イタチゴッコのようを呈してきた。漏水問題では住民の通報もなく、垂れ流しになっけても関心が無い住民の教育・モラルが課題となっている。また、全水使用量のうち、約7割が農業用水として使用されている事も問題の一つといえる。これについては後述したい。

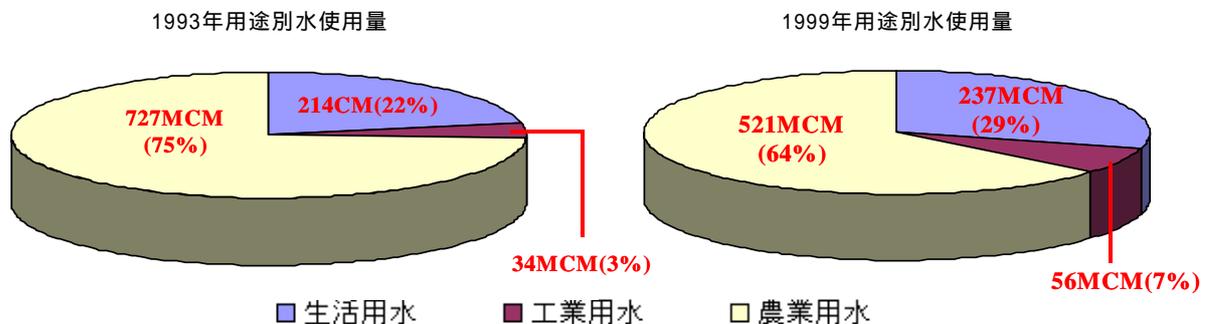


Fig 1.3.1 用途別水使用量の変化 * MWI HP (www.mwi.gov.jo)



Fig 1.3.2 漏水の様子

(浜津 2002/02/11)

では、実際の水使用量の変化はどのようになっているのだろうか。2002/02/05 から 2002/02/18 で実際にヨルダンでのデータ収集をした結果から次のような事がわかった。1993年から1999年までの水使用量の変化は次の通りである。人口は400万人から490万人に増加（年平均3.8%程）しているが、年間の水使用量は987 MCMから814MCMへと減少している。本来なら、人口増加に伴い、水需要も増加するのだが、人口増加に伴い水使用量が低下しているのは、使用できる水源が減った事と政府のキャンペーンにより水使用に抑制がかかったと予想される。しかし、人口増加による絶対的な水需要を考えると農業用水を都市生活や工業用水に転用する必要があり、農業へ利用できる水源と水量確保が重要となる。では、水源別の水使用量はどの様になっているのであろう。水源別に見ると、地下水と表流水（川・イスラエルからの条約水）の使用量が低下している事がわかる（参照：Fig 1.3.3）。総水使用の内半分以上を地下水に依存し、その内でさらに灌漑用に約13%も使用されている。最近では地下水位の低下や地下水の栄養塩類が増えてきた事から、灌漑用水としての利用も難しくなっている（参照：Fig 1.3.4）。また、先の項で記述したが、中東全域にわたる少雨傾向から、イスラエルのティベリアス湖の水位低下と肥料や汚水の混入による水質汚染も始まっている。それに加え、イスラエルからの条約水量も減ってきており、ヨルダンでの地下水汚染、地下水量への影響もある。つまり、上で述べてきた水源だけでは問題解決できない状況になっており、現在までの水源に依存するわけにはいなくなったのである。つまり、新しい水資源開発があまり望めない今、地下水に変えて汚水処理水を循環再利用しなければ、安定した水供給が不足していく事を示している。

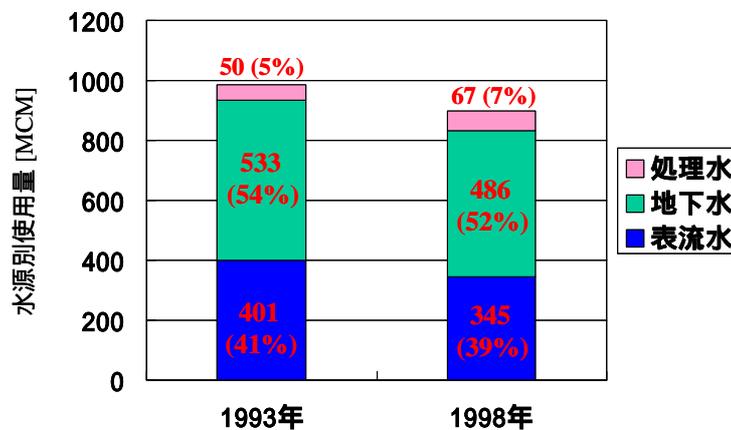


Fig 1.3.3 水源別水使用量の変化

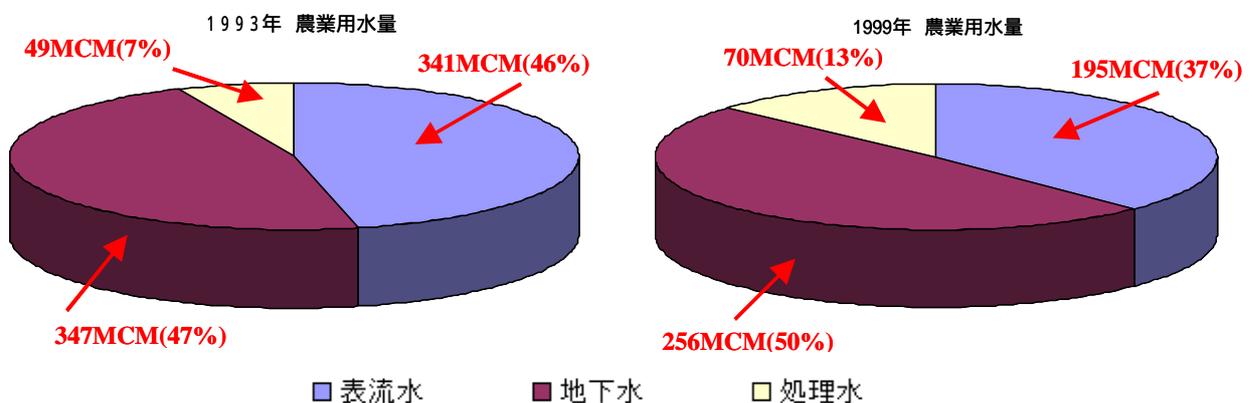


Fig 1.3.4 種類別農業用水量の変化

* NCARTT HP (<http://www.ncartt.gov.jo/>)

さらに生活用水増大と合わせ、農業用水に地下水をまわせなくなることを考えると、どの様に農業用水を確保するかが、水不足を考える上で重要といえる。これは98年の水源別水使用量である。一番多いのが地下水（循環地下水と化石地下水）の54%で、表流水が39%、処理水が7%となっている。表流水の年間の総流出量は計算すると、707MCMと予測され、その内ダムに還元されるものは、約310MCMになる。つまり、利用が容易な表流水を有効な水源として使用する事は大変難しいといえる。次にイスラエルからの和平条約水だが、一定の供給がなされていないのが現実で、ティベリアス湖からの流入を制限されている今、安定した水源とは言えない。残る地下水について上記は推定の値である。実際は私有地に不法に掘った井戸が多くあり、使用量はさらに多いといわれている(参照:Fig 1.3.5)。

ここで問題なのは、現在使用している地下水が循環地下水であり、地下水の充填に追いつかないサイクルで揚水されている事だ。使用量が減ったといっても重要な水源で有る事は事実であり、今後も地下水環境や用水量について監視をすべきである。試算によれば、年間用水量を420MCMとすると、降水による地下浸透を考えても、持続的に揚水できる水量は年間275MCMであり、現在の約40%が削減される必要があることが分かった。また、化石水の利用については使用量は少ないが、化石水がリニューアブルされない事を考えると、安易に利用する事は出来ない。また、地下水の賦存量を計算する事は難しく、現在一番ポテンシャルがあるとされているディシの地下水はサウジアラビアも用水している事から、安易に利用する事は困難である。

次に污水处理の問題である。現在のヨルダンの水源は主に地下水であると述べてが、その地下水と污水处理水には大きな関係がある。現在利用されている地下水の大部分は灌漑用水として利用されているが、今後生活用水の需要が高まる事を考えると、地下水を生活用水に転換利用される事が考えられる。だが、多くの地下水源は循環地下水である事から、河川やワジより充填されるため、河川に処理水を流しているヨルダンの一部地域では、処理水の水質が生活用水に大きく関係する。

污水处理が十分でない地域では、BODが日本の流入水と同じ程度までしか浄化されていない処理場もあり、処理水を転用するにしても適当とはいえない。また、処理水利用がこのレベルで続けられ、なおかつ、今後全国各地に広まれば、地下水への影響やワジ周辺的环境への影響も拡大する恐れがある。それに加え、農作物に生下水や十分に処理されていない処理水が使用される事になれば、重金属や衛生についての問題も考えなければならなくなる。重金属は分解される事がなく、汚水や処理水がそのまま利用するような事になれば、土壌汚染や生物濃縮による人体への影響も大きくなる。また、下水や不十分な処理を成された処理水中には硝酸性窒素が多く含まれており、人体への影響を考えると今以上に高度な污水处理を行わなければならない。特にヨルダンのような少雨・乾燥地帯では、雨による土壌外への流出も無い事から、灌漑用水として利用すればする程土中に溜まってしまう。土中に留まった重金属は雨季に流れ出し、周辺地域を重金属や栄養塩類、硝酸態窒素等で汚染する可能性もある。また、栄養塩類は土中で水分の蒸発により濃縮され、塩害にも繋がってしまう。普通農作物には栄養塩類はある程度は必要であるが、乾燥地帯では蒸発速度も速く、従来のようなただ水をまくだけの方法だと、新たな塩害を招く可能性もある。そこで、従来よりも栄養塩類を効率よく除去する方法が必要となる。また、処理水利用に当たり、スプリンクラーのようなもので散水する場合、人体への影響もあるので、土壌汚染の問題だけではなく、健康面でも新たな手法の開発が今後ますます必要とされる。

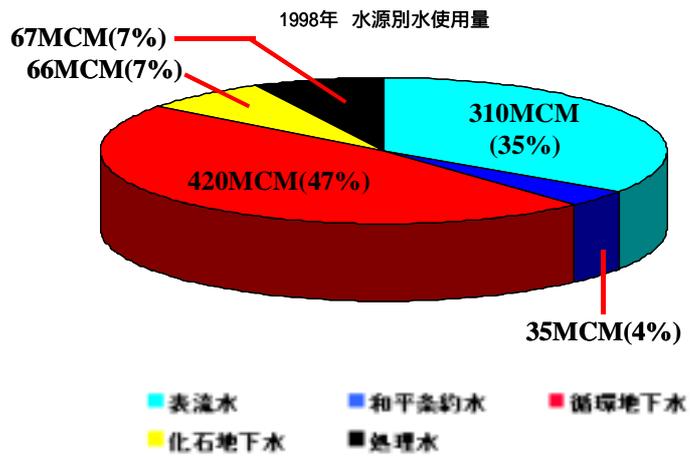


Fig 1.3.5 1998 年度，水源別水使用量

1.4 水不足がもたらす環境への影響

では、実際に水不足が原因でヨルダン国内にどのような問題が起こるのだろうか。はじめに、実際に起こっている水不足による環境への影響について述べる。

ヨルダンには数々の遺跡があり、その中の一つに世界遺産となっているアムラ城がある。現在では砂漠の真っ只中にあり、併設されている井戸も干上がった状態だ(参照: Fig1.4.1)。この城も、昔はキャラバンの宿として栄えていた時もあり、その証拠に、城中には浴場や宴会場を備え、狩りに来た時の宿の跡もある。8世紀頃には、この辺りは川や森があり、多くの動物も生息していた。現在でも壁画には狩の様子や動物の絵などが残され、当時の様子を窺い知ることが出来る。ここが砂漠になったのは恐らく自然的要因であるが、実際に城や周辺の町が、オアシスが水不足によって滅びたことには間違い無い。しかし、これは気の遠くなるような時間の結果起きた出来事なのだが、人間が環境を破壊するとなれば数年とかからないようだ。それは、アズラックというオアシスの枯渇の例からわかる。

アズラックは人間が水不足問題に対して無計画に地下水を揚水した結果起きた環境破壊の例である。ヨルダンには最近まで、アズラックというオアシスがあった。アズラックオアシスは、首都アンマンの東約100kmに位置し、シリア南部の雨が地下浸透しアズラック周辺で湧き上がる事により出来ていた。あたりは一面ミドリで、渡り鳥や野生動物の宝庫であり、1960年代の調査では7つのオアシスで形成されていた事が分かっている。しかし、首都アンマンや周辺都市の人口増加による水需要の増大や農業地域で不法に井戸を掘り地下水を過剰揚水したために、地下水位が急激に低下し枯れてしまった。実際に上水として揚水されたのが、1960年頃だが過剰揚水が始まった1980年代からは地下水位の低下と共にオアシスも姿を消していった。降水量が少なく、独自の水源に乏しいヨルダンにとって、地下水は大変貴重な水源といえる。しかし、過剰揚水により広大な広さを誇ったオアシスの枯渇は実際に起きたのである。1980年代に15MCMだった地下水揚水量が90年代に入り30~40MCMになり、急激に地下水位が低下した。揚水量は30年間に約10倍に跳ね上がり、このオアシスは現在では塩類が表土を覆う土地へと姿を変えてしまったのだ。周辺には現在でも14本の水道用井戸のほか500本以上の不法な井戸により揚水が続いている(参照: Fig1.4.2)。イリーガルな井戸の詳細な把握はなされていないが、揚水量を推計すれば、総計50MCMとなると言われている。

以上の事から、水不足の問題は環境へも大きな悪影響を引き起こす事がわかる。実際に水不足による過剰揚水は何本もの井戸を枯渇させるばかりではなく、地下水の塩類濃度上昇を促進し、農業のみならず、今も数少ない多くの森林環境への影響も深刻である。



Fig 1.4.1 アムラ城と井戸 (浜津 2002/02/09)



(浜津 2002/02/09)

Fig 1.4.2 アズラックオアシスと、不法農園

1.5 研究目的

これまで様々なヨルダンの現状を述べてきたが、水不足問題は周辺環境へ重大な問題を引き起こすだけでなく、安全な上水を確保するのも深刻な影響を及ぼす可能性が有る事が分かった。また、今後の水需要の増大と、新たな水資源開発が望めない今、水不足が社会不安を煽る大きな要因となっており、早急な対策が必要で有る事もわかった。今後の水不足問題を解決するにあたり持続可能な水資源管理と開発、国内需要の高い農業用水を従来型の水源に頼らず、処理水を転用利用する事がヨルダンのような乾燥地域で必要だと考える。

以上のような現状をふまえ、本論では発展途上国にも適用可能な污水处理技術の提案する。ヨルダンのような、資金不足、人材不足に悩む発展途上国でも利用可能な技術導入が必要十分条件となることから、四万十コンセプト（Low Cost, No Chemical, Easy technology, Easy operation and maintenance）にのっとりた污水处理技術・方法の策定を行う。ここで、重要なのは持続可能な污水处理であるということである。実際にお金をかければ良いプラントはできる。しかし、実際に維持管理を運営していくのは現地の人たちであり、高度な浄化施設を建設・維持管理するのは困難な状況である。そこで本論では、現地で入手可能であり安価で、循環再利用できる材料を使用したエコロジカルな污水处理の手法について検討する。本論における浄化装置には固形廃棄物が使用されている。これは都市部で問題となっているゴミ問題解決にも有用であると考えられる。実際に固形廃棄物の循環再生利用の試みは今まで多くなされているが、今回は使用済みペットボトル・ガラス瓶を加工し、接触ろ材に使用した処理方法に注目して実験し、浄化特性の把握を行う。

つぎに、処理水を灌漑用水に利用する事により、生活用水を確保し、節水へ繋げるという提案を行う。ヨルダンにおいても污水处理の実験は多くされているが、実際には灌漑用水に向かない水質での実験が多く、地下水汚染や土壌汚染につながる危険性がある。そこで、本研究での処理水が循環利用可能であるかを策定し、導入時にどのような効果があるかについても追求していく。処理水転用が可能になれば、不法な井戸や、上水の盗水による灌漑問題の抑制、重要な地下水源の節水の効果も期待できる。それに加え、ヨルダン国内の地形特性を考え、下水処理場から灌漑する地域への処理水の運輸についても触れておきたい。

1.6 研究方法

本研究の方法、論文の構成は以下に示されたように行われている。

- (1) ヨルダン水資源問題の現状把握
現在のヨルダンの水問題を把握した上で、何が水質浄化に必要なかについて考える。
- (2) 固形廃棄物を利用した接触ろ材の浄化特性把握
乾燥地でも利用可能と考えられる接触ろ材を実験し、浄化効果を測る。また、浄化のメカニズムについて、いくつかの予想をたて、今後の接触ろ材の効率向上に役立てる。
- (3) ヨルダンでの処理水利用の把握
新手法による処理水利用を考える前に、実際にヨルダンではどのような処理水利用がなされているかを把握し、灌漑用水転用での手法を検討する
- (4) 新手法による処理水導入の可能性の提案

2 自然循環式水処理実験

本章は、乾燥地のように水環境が大変に厳しい条件下での污水処理技術の提案が目的である。また、自然環境が苛酷な地域に適用できる技術であれば、その他の地域へも技術移転が比較的容易に導入可能ではないかと考え、固形廃棄物を原材料とした接触ろ材を策定した。つまり、現地で入手可能であり安価で、循環再利用できる材料を使用したエコロジカルな污水処理方法の可能性についての実験をした。固形廃棄物の污水処理への循環再生利用の試みは多くなされているが、本論では従来では接触ろ材として使用されていなかった、使用済みペットボトル・ガラス瓶を原材料にした、中空チューブ・発泡骨材を接触ろ材に使用し実験を行った。また発泡骨材には廃棄された貝殻も混ぜ入れている。本来これらの製品はアスファルトの透水材などとして開発されたものだが、多孔質であり表面積が大きいという性質から、下水処理水の高度処理に効果を発揮するのではないかと考え、高知工科大学の下水処理施設より、排出される処理水を利用して実験を行い、ペットボトル・ガラス再生品の今後の有効利用の可能性について考察した。

2.1 実験

実験は、高知工科大学下水処理システムの2次処理水を中空チューブ・発泡骨材を用いたフィルターで、透過時間を一定にしてろ過する。2次処理水と実験で得られた浄化水のそれぞれを水質測定する。測定結果を比較し、ろ材と時間経過による依存性の水質浄化能力を明らかにする。

実験装置の全体図を Fig 2.1.1 に示す。各装置の詳細は以下の通りであり、装置は全て市販されている材料を加工し製作した。これらは市販されている塩化ビニールパイプを加工し製作(直径:10cm,長さ:1.5m,容積:11.775ℓ)。フィルター内下部には、排水がスムーズに行われるように砕石層がある。また、排水口を上部に設けてあるため、常にろ材が水に浸かるようになっている。また、流入水量は排水量が計算し調節した(参照: Fig 3.1.1)。

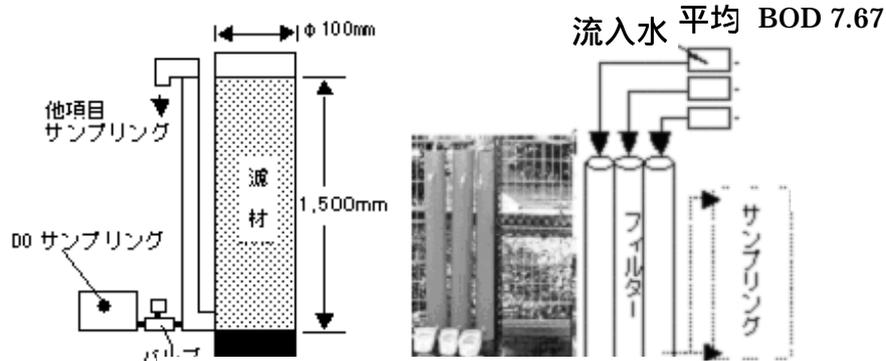


Fig 2.1.1 実験装置全体とフィルター BOD 4.32



Fig 2.1.2 発泡骨材



Fig 2.1.3 中空チューブ

上記で述べた実験装置では中空チューブ (参照: Fig 2.1.2 ,Fig 2.1.3)と発泡骨材 (アコヤ貝殻 5%・10%含有 . 以後, 5%発泡骨材・10%発泡骨材)の3種類を別個にフィルターろ材とした . ろ材はそれぞれのフィルターに詰め, 2次処理水を定期間隔で透過させ, 透過前・透過後の成分変化を測定した . なお, 高知工科大学では回遊式間欠曝気浄化槽を用いた 2次下水処理システムを導入しており, 本実験ではこの2次処理水を原水として使用した . 透過時間は 1・2・3・4・5・6・7・8・9(時間)とし, 測定された中空チューブ・発泡骨材 (5%・10%)の有効空隙率は中空チューブが高い値であり, あとはほぼ同じ値である (参照: Table 2.1.1) . また測定水質項目として BOD, COD, 全窒素(TN)の数値を測定した .

Table 2.1.1 有効空隙率

各ろ材	有効空隙率 (%)
中空チューブ	50.79
5%発泡骨材	50.71
10%発泡骨材	50.19

2.1.1 接触ろ材の組成

使用した発泡骨材, 中空チューブの特徴・組成は以下の通りである .

発泡骨材の特徴

- ・ 空き瓶等のガラス廃材から作られたリサイクル製品である
- ・ 約 900 ℃ で燃焼して作るため, 有害物質の溶出が少なく, 地下水等への影響が少ない .
- ・ 多孔質間隙構造で, 単位容積あたりの表面積も非常に大きく, 軽量かつ耐久性に優れている .
- ・ また, ガラスの性質から熱や酸に強く変質しにくい .
- ・ 自由に他の材料と混ぜ合わせることが可能 .
- ・ 製造条件により, 自由に間隙構造を調整できる .

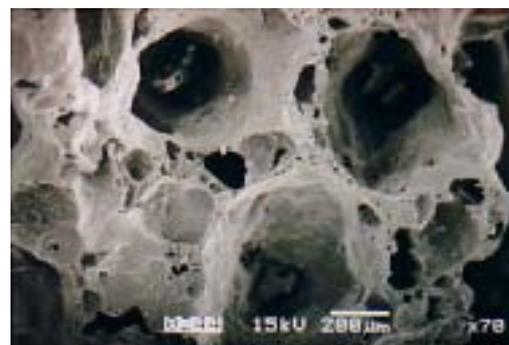


Fig.2.1.1 発泡骨材顕微

従来の利用用途は, 軽量コンクリート製作の為に粗骨材や, 吸水性に優れる事から屋上緑化や湧水処理の使用される保水材等に利用されており, 最近では土壌改良剤や雑草防止など様々な用途に利用されている .

Fig 2.1.1 は発泡骨材の顕微鏡図である . 多孔質であり, 多くの間隙を有することがわかる . また, 本研究で用いた発泡骨材は貝殻 (カルシウム) を含有している . 地理的に比較的近いヨルダンで, 廃棄貝殻の再利用が出来れば, 地中海で問題となっている貝殻廃棄の問題の解決にも一役買うと考え混合されている . またカルシウム成分によるリン吸着にも期待が出来る .

中空チューブの特徴

- ・ ペットボトル等のプラスチック廃材を利用したリサイクル製品である。
- ・ プラスティックなので、形成が容易である。
- ・ 中空チューブ形であり、従来までのプラスチック製接触ろ材よりも、表面積が大きく、生物被膜形成がより効率良く行える可能性がある。

従来の使用方法はアスファルトの透水材と使用されているものであるが、本研究ではその形状と材料に注目し接触ろ材に転用した。従来のろ材により表面積が大きいことから、汚水との接触面積も広がり高効率な水質浄化が予想される。

以上が各ろ材の組成なのだが、これらのろ材に使用したものは、どれも固形廃棄物の再利用により生まれたものであり、乾燥地でも比較的手に入り易いものばかりである。また各ろ材は、原料の性質から比較的形成も楽に行え、現地にある技術でも比較的容易に導入できる。

2.1.2 各ろ材の浄化特性

今回の実験結果は高知工科大学内下水処理施設で採取したデータに基づき分析したものである。処理水の水温は平均 21 であった。なお全てのサンプリングには高知工科大学の二次処理水を使用し、全て同じ所からサンプリングした。流入時の各値は **Table 2.1.2** に示す。

Table 2.1.2 二次処理水の各値

Inflow	mg・l ⁻¹
COD	26
BOD	7.67
TN(全窒素)	28.2
TP(全リン)	11.5

2.2 実験結果

各ろ材別の浄化能力を分析し、平均した結果を示す（参照：Fig 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3）。

中空チューブ、5%発泡骨材、10%発泡骨材の全窒素の値は、大体3時間経過した後に低下を見せている。3時間後の除去性能の低下の理由は、毎回同じ時間に計測しているところから考えると、汚水の流入負荷がこの時間帯に低下しているものと考えられる。また、どのろ材も最も透過時間が長い9時間後の水質浄化が顕著であった。全窒素の除去率が一番高かったのは中空チューブであった。また3~4時間の間にBODと全窒素の除去能力が低下している。

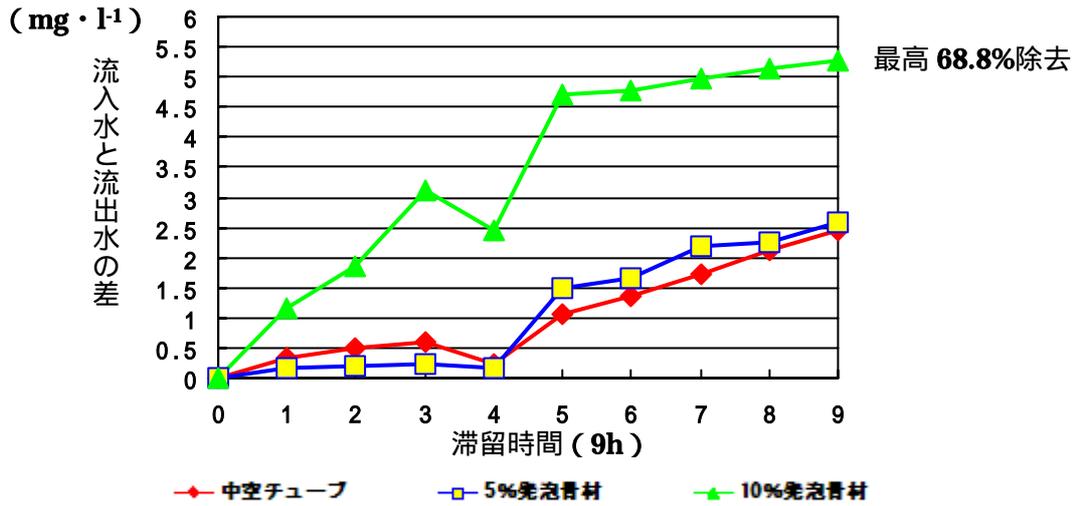


Fig 2.2.1 BOD 浄化特性

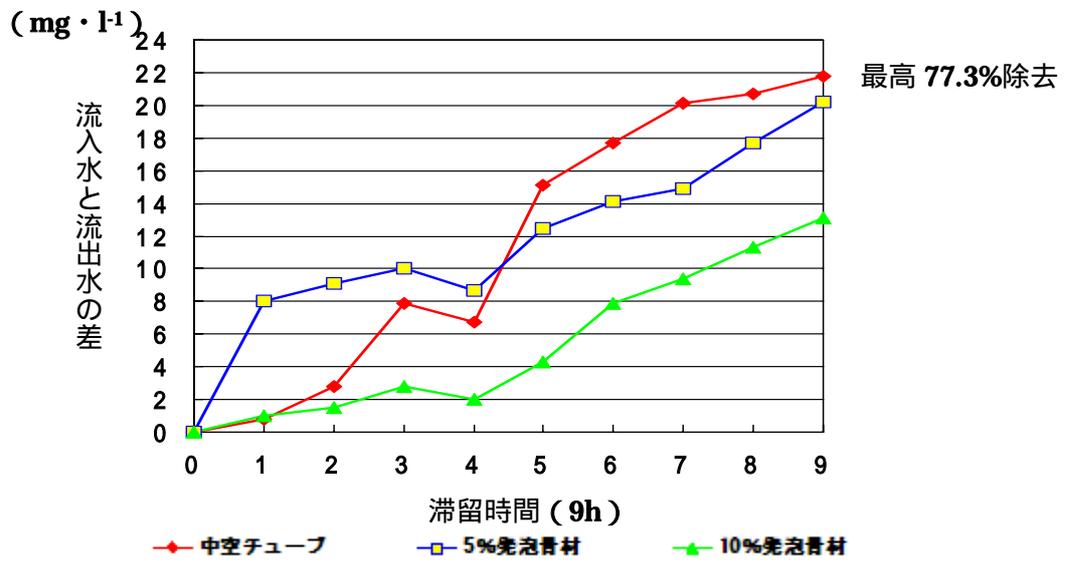


Fig 2.2.2 全窒素浄化特性

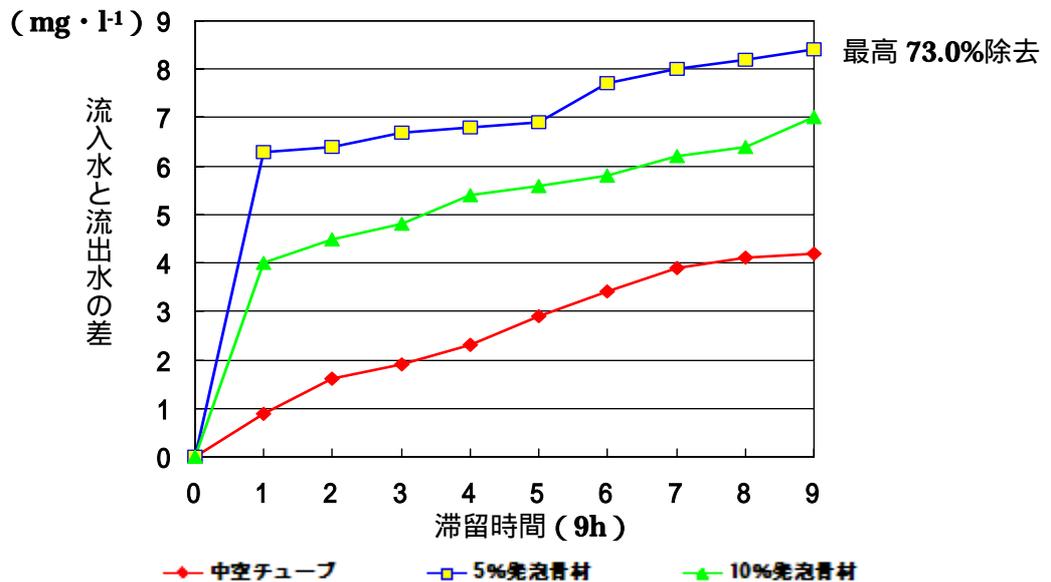


Fig 2.2.3 全リン浄化特性

2.3 考察

今回実験をおこなった結果、リンの除去に関して大変有用な結果が得られた。窒素に関しても、除去性能は認められた。各ろ材の有効空隙率に差があまり無いことから、微生物定着量もほぼ同じであったと考えられる。しかし、10%発泡骨材の除去性能が低い事は何らかの要因があると考えられる。

本研究は工科大の二次処理場の嫌気性ろ床に流入前の汚水を使用したことから、好気性条件下であるといえ、好気性微生物（亜硝酸菌や硝化菌）によりアンモニア態窒素(NH₄-N)は亜硝酸態窒素(NO₂-N)や硝酸態窒素(NO₃-N)に酸化される。その後嫌気性である本実験装置に流入したため、嫌気性微生物の作用により亜硝酸態窒素や硝酸態窒素を還元し、亜酸化窒素や窒素ガスに変換された事により窒素除去が行われたと考えられる。にもかかわらず、何故10%発泡骨材では除去性能が低下していたのかという点、一つの可能性として、アルカリによる嫌気性微生物の活動阻害が考えられる。発泡骨材には貝殻を含有しているため、カルシウム成分が流出している事が考えられる。実際に5%、10%発泡骨材は中空チューブより浄化能力が劣っている事からアルカリによる除去性能の阻害が予想される。それに加えて、カルシウム含有の発泡骨材ではリン吸着反応に伴い水酸化物イオンの放出が起こりpHが上昇する可能性もある。つまり、カルシウムの流出によるアルカリ化だけが、除去性能に影響を与えているという訳でもない事が予想される。以上の理由により嫌気下では脱窒阻害を与え窒素除去能の低下が起こった可能性がある事が分かった。

次にリンだが、発泡骨材で大変興味深い結果が得られた。従来までの処理は排水中のリン酸イオンを電解により、他の物質と反応させ不溶性のリンにし沈殿させるか、直接凝集剤を添加し凝集される方法が多く執られてきた。どちらもリンを金属塩の形で沈殿させ除去する方法であり、本実験ではどちらの手法もとっていないことから、なんらかの方法によりリン除去が行われたことになる。予測としては、生物学的なリン除去等がある。一般に、生物学的なリン除去は、好気性と嫌気性を繰り返すことにより行われる。この処理は嫌気環境の後に好気環境とすることによって、汚水または活性汚泥中のリン酸蓄積細菌が嫌気環境下でポリリン酸を放出し、次に続く好気環境下では放出した以上の量のポリリン酸を菌体に取り込む性質を応用した現象を利用した方法である。しかし、これはあくまで、嫌気性と好気性ワンセットで行われる処理であり、本研究では嫌気性条件を維持し研究した事に加え、この処理では脱リン菌が常に増殖できる環境下であり、なおかつ汚泥またはスラッジに処理されたリンは取り込み、余剰汚泥として系外に排出され初めてリン除去となることから、生物学的に処理されたとは考えにくい。次に考えられるのは、石灰成分流出による凝集である。これは、リン酸イオンとカルシウムイオンが反応しリン酸カルシウムとなり、結晶化するという仮説である。つまりカルシウムからリン酸塩への直接的な塩の組換えである。貝殻の成分は90%以上がカルシウム炭酸塩(CaCO₃)で構成されている。つまり、ただのカルシウム成分だけではなくカルシウム化合物から出来ているという事である。炭酸カルシウムはその性質から、リン(リン酸)を不溶性のリン酸カルシウムとして固定する。そのことにより一種の凝集作用が起こったと考えられる。しかし、この説を考えるには処理水の詳しい物質収支の把握が必要となるため断定は出来ない。しかし、リン除去が起きたことは事実であり、上記の可能性についての証明がこの接触ろ材の開発に大きく関係する事は間違いない。

2.4 まとめ

今回の実験では各項目の浄化過程解明にはいたらなかったが、浄化性能を有する事は分かった。リンに関しては、全く予想外の好結果が得られた。BODに関しては期待していたような浄化効果あまり見られなかった事から、C/Nとの相関性と、微生物定着までの時間を把握する必要がある。中空チューブのBOD浄化作用が低いのは微生物の定着が難しい事も予想されるが、嫌気性微生物が生物膜を形成するのに時間が必要だった事が予想される事から、中空チューブにおいては生物膜形成にかかる時間の把握と特性をしる必要がある。それに加え接触材の耐久時間や、滞留時間9時間では浄化能力の限界は見てこなかった事から、滞留時間延長による浄化能力の把握が必要である。

また、今後発泡骨材は、好気状態での処理に有用な接触材としての可能性が見えてきた。理由として、カルシウム成分の流出による、アルカリの供給に関する結果を示したことから、好気条件での利用が有効になるものと考えられるからだ。一般に嫌気性微生物は酸性の条件下で活動が活発になり、好気性微生物ではアルカリに近い状態で活性化されることから、アルカリ供給が好気で行われる事により、好気条件での利用が有効になるものと考えられる。つまりカルシウムによる、アルカリ化とリンの生物学的除去が特定できれば、硝化反応後の酸性化に対して中和反応と、嫌気時の微生物の活動促進が予想される事から従来の手法より、効果的に脱窒・脱リンが行える可能性があるという事である。しかし、本実験は循環型の実験を行っておらず、循環効果による生物学的硝化脱窒反応の有無を確認していない。つまり、今後の循環型での浄化特性の把握により、より高いポテンシャルがわかる可能性もある。嫌気・好気を繰り返す実験では循環比別の浄化特性が今後の性能向上に関する大きなキーワードになることから、好気性条件下での水質浄化特性の把握と、発泡骨材によるリン除去のメカニズムの追求が必要となる。リン除去は発泡骨材の組成による炭のような吸着か、何らかの化学的作用による除去、生物学的除去が考えられる事から、リン除去に関するメカニズムの把握は処理前のリンの状態と処理後の物質収支に関して測定する必要がある。存在するリンの状態を把握すれば、リンがどのようなプロセスで除去されたかを把握できるからである。石灰凝集法では、 $\text{Ca}_2(\text{OH})\text{P}_04$ 、 $\text{Ca}_3(\text{P}_04)_2$ 、晶析脱リン法では $\text{Ca}_5(\text{OH})(\text{P}_04)_3$ 、炭酸塩からリン酸塩への単純な組み換えでは CaHP_04 、 $\text{Ca}_4\text{H}(\text{P}_04)_3$ が計測されると予測される。

本論は主に乾燥地域での水質浄化が最終目的だったのだが、極めて有用なリン除去性能が見られた事から、今後さらに幅広い利用用途も予想される。発泡骨材によるリン除去性能は旧来までの科学的・電氣的な吸着手法より安価で行える事から、除去性能を向上出来れば、大変有効な手法となりえる。またこの結果から流入水をヨルダンの二次処理水を利用したとしても、処理後の水は灌漑用水に転用可能な水質になる事が分かった。

3 再生水利用計画

処理水を農業や工業に転用する事は、乾燥地帯であるヨルダンでは、極めて重要なテーマである事はこれまでに述べてきた。ヨルダンでは生活用水に適している淡水（循環・非循環地下水、表流水）の70%近い水量を農業に利用している。灌漑用水の水源は主に、表流水、地下水、処理水である。1999年では総供給量の521MCMのうち、表流水が37%、地下水が49%、処理水が14%を占めていた（参照：Table 3.1）。今後の地下水及び表流水を生活用水として転用していかなければならない事を考えると、処理水の積極的利用が必要となる。また、今後の生活用水の増大に併せて問題なのは、北部エリアの農業用水の実態である。高原地帯が多い北部エリアでは、地下水による灌漑が多くなされており、過剰揚水による地下水の地下水位低下、枯渇、水質悪化の問題が深刻化している。しかし、ヨルダンにおいてこれ以上農業用水を削減する事も出来ないのが現状である。

Table 3.1 ヨルダン渓谷の灌漑用水供給量

単位：10⁶m³

項目	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	
表流水	341	302	259	253	266	224	195	37%
地下水								
高原	291	254	237	237	222	209	198	38%
中原	3	3	3	4	4	4	5	1%
ヨルダン渓谷	53	58	52	56	44	46	53	10%
地下水小計	347	315	292	297	270	259	256	49%
処理水								
高原	4	6	6	7	8	11	11	2%
ヨルダン渓谷	45	45	49	52	53	60	59	12%
処理水小計	49	51	55	59	61	71	70	14%
合計	737	668	606	609	597	554	521	100%

* MWI HP (www.mwi.gov.jo)

現在ヨルダン政府においても、処理水の積極利用に向けて様々な試みをしているようだが、あまり効果が出ていない。また、一般的に処理水転用といっても、事例が多くあるわけではなく、政策においても難しい問題を多くはらんでいる。実際に処理水転用が進めば、かなりの節水につながり、上質な水資源確保が可能になるのだが、水需要予測と政策、また水資源の量的管理は大変難しい問題である。日本では、処理水の積極的利用はなされており、実際に我が高知工科大学でも高度処理水をトイレ用水、散水用水、防火用水などに処理水再利用なされている。また、高知県東播地域では処理水を山に散水している試みもある。しかし、ヨルダンのような特殊な地域とは、問題の性格も大きく異なり、簡単に処理水再利用へのプロセス、手法を転用できない。

本章の目的は、北部エリア（高原地帯）からヨルダン渓谷への農地の移転による地下水源の保全と節水の可能性について明らかにしていき。実験で行った処理技術をヨルダンで二次処理・三次処理施設として用いると仮定した時に、実際に灌漑用水へと処理水を転用出来るのか、また処理水転用には何が必要なのか、どの様に施設を導入するのかについて述べていく。

3.1 ヨルダンの処理場の概要と処理水の利用状況

では、実際にヨルダンではどのような処理水利用がなされているのだろうか。ヨルダンでは多くの污水处理場が処理水の再利用を進めている。実際にはどのような処理場があり、どのような方法で処理が行われ、どのような再利用がなされているのだろうか。2001年時点で、ヨルダンには19箇所の下水処理施設が稼働している。(Fig 3.1.1 参照)



Fig 3.1.1 ヨルダン処理場位置図

* CIA HP (<http://www.cia.gov/cia/publications/factbook/geos/jo.html>)

首都アンマン周辺地域をカバーするのはアッサムラ処理場を含む6つの処理場で、ラグーン方式(安定地方式)の処理形態がとられている。通称天日干しシステムと呼ばれるこの処理は、嫌気性池、好気性池、熟性池からなる広い土地と、太陽光を利用したヨルダンの気候風土に適した処理である。また、高度な技術を必要としないため、古くから導入されていた方式である。

ワジエシールという下水処理場では、土地確保ができなかった為に、好気性池の代わりに人工的に暴気処理を行っている。その他の10箇所の処理場では活性汚泥法等の処理を組合せた集中処理を行っている。都市部の汚水処理はアッサムラ下水処理場で行っているが、流入量の増加が問題となっている。下水道の普及率は意外と高く、人口比で45%~90%と言われ、都市部での普及率は極めて高く約82%であり、アッサムラ下水処理場が都市人口約70%の首都圏内の下水道普及率を90%にまで引き上げている。しかし、下水普及率が高いということは、都市人口の増加に伴い、各処理場の汚水流入量の増加を意味し、ここ10年間で処理場に流入する下水量が約2倍になっている。そのため、設計値を大幅に越える流入量に対応するために、十分な対流時間を確保できない事から、処理しきれない水を河川にそのまま流出させている。(参照: Fig 3.1.2)



Fig 3.1.2 アッサムラからの流出水 (浜津 2002/02/07)

また、下水処理水の水質は、住民の水使用量が極端に少ない場合でも、大きな影響が現れる。水使用量が極端に少ないと、特にBODと栄養塩類濃度の上昇がみられる。BODでは最大で $1500\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ に達する場合もある。つまり、下水流入量が少なくても、高濃度のBODや塩化物により処理性能に大きく悪影響をもたらすと言える。特に、自然のシステムを利用したラグーン方式では極端に、処理性能に影響を受けやすい事が問題である。アッサムラでの現在の栄養塩類濃度は、 $700\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ から $1200\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ と大変高い値を示し、流入負荷と一般生活排水による水質悪化がいかに深刻な状況にあるかがわかる。ヨルダンの排水基準によると、 BOD_5 は $50\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ を超えてはいけない事を考えると、大幅に基準を超えてしまっている。この値は日本の生下水の値と同等の値であり、河川の汚染に繋がることも容易に想像される。実際にこの水質基準を超える処理場は19の処理場のうち、9つの処理場が基準を満たしていない。しかも、 BOD_5 の値が基準値の2倍を超える処理場は6つあり、それらの内の4つはラグーン方式の処理場である。また、水質悪化の問題だけではなく、熟成池などで発生する藻類の発生が下流水域で大きな問題になると

考えられる。実際に現地で調査はなされていないが、日本でも問題となっているマイクロキスティスの発生も予想される。この種の藻類はある毒素を生成し、人体に影響が有る事が確認されており、日本では霞ヶ浦や琵琶湖で毒素による飲料・農業用水への問題が発生している。

では、このような処理水の水質状況下で、どのような処理水転用の試みがなされているのだろうか。ヨルダンでは古くから処理水の間接的な利用が行われていた。昔から処理水は川やワジに流されており、表流水に希釈され、灌漑用水としてワジを潤し、無断または合法的に利用されてきた。処理場から排出された処理水を直接利用してきたケースもある。また、現地で見掛けたのだが、街頭のトラックで売っている安い野菜は生下水を直接かけて作ったものであった。衛生面の問題があるが、栄養塩類が多いためか、青々とした大きな野菜が出来るようである。危険性から考えれば、今後の政府の対応と衛生教育が重要だと痛感させられた。1980年代からは積極的な処理水のリサイクルが始まり、特に灌漑用水として利用する試みが始まった。1985年頃には政府による再利用計画が推進され、新しい下水処理場には再利用システムが取り入れられ、再利用も増加して行った。1991年には排水の水質に関する法律が整備され（WHOのガイドライン“Guidelines for Discharge of Industrial and Commercial Wastewater into the sanitary Sewer System”）、1996年には水源環境の保全を考え、より厳しく生活排水の下水処理水質に関する基準を法律で制定された（溪流、ワジ、河川、表流水、地下水、灌漑用水再利用に対する処理水の排出基準）。しかし、実際には基準値を大幅に越える水質であり、全ての既設処理場の下水処理水は、すべての農作物に使用する事が出来る水質ではない。（参照：Table 3.1.1）

Table3.1.1 各処理場の排水水質と農業転用の水質基準

		process	NO ₃ (mg·l ⁻¹)	PO ₄ (mg·l ⁻¹)	NH ₄ (mg·l ⁻¹)	TDS (mg·l ⁻¹)	TSS (mg·l ⁻¹)	COD (mg·l ⁻¹)	BOD ₅ (mg·l ⁻¹)
Wastewater Treatment Plants	As-Samra	p	3.9	43.0	129.0	1124	136	320	151
	Aqaba	p	3.8	36.0	42.0	880	1524	266	83
	Ramtha	p	3.0	54.5	206.0	1247	222	527	300
	Mafraq	p	2.4	79.0	178.0	1005	195	541	255
	Madaba	p	2.5	50.0	171.0	1209	283	671	279
	Ma'an	p	3.1	30.0	103.0	1163	179	325	115
	Irbid	a	1.2	23.0	132.0	961	65	226	42
	Jerash	a	7.2	19.0	42.3	1017	51	110	34
	Abu-Nuseir	a	1.5	47.0	8.0	920	32	86	23
	Salt	a	14.1	24.0	39.1	772	67	135	32
	Kufranjeh	f	60.0	39.0	43.5	846	56	117	31
	Baqa	f	2.4	46.8	190.0	1123	249	782	-
	Karak	f	9.0	39.5	82.0	806	60	183	37
	Tafielah	f	13.8	39.4	68.0	824	69	156	42
Standard(1995)	Cooked Vegetables		50	-	-	2000	200	500	150
	Ripped Tress & Industrial Product		50	-	-	2000	200	500	150
	Discharge to Flowing and accumula		25	15	15	2000	50	200	50
	Recharge aquifer		25	15	15	1500	50	200	50
	Fish		-	-	0.5	2000	25	-	50
	Irrigate Parks		25	15	50	2000	50	200	-
	Irrigate Fodder		50	-	-	2000	250	700	250

[p]=安定地，[a]=活性汚泥，[f]=散水ろ床

しかし、ヨルダン渓谷では 10,000ha ほどの農地が処理水を利用し灌漑を行っている。現時点での、再利用されている汚水処理水の総量は約 50MCM といわれており、不法に利用されているものを併せても、次のような使用状況にある。

1 5 MCM/年： 水質の上限が決められた農作物に使用

3 5 MCM/年： 淡水と混合し使用。ヨルダン渓谷で行われる農業の大部分を占める

以下の表は下水処理場の処理方式と処理水利用の状況を示している（参照：Table 3.1.2）。この事からわかるように、処理水利用がなされているうちの半数以上が安定地方式の処理場からの処理水の利用であり、今後処理水の転用を考える上で灌漑されている農作物との相性や農業のスタイルも確立されている事から比較的容易に処理水利用の促進を図れると考えられる。また、他の下水処理システムより、処理水内に有機物等が多く含まれる事から、灌漑に適していると考えられる。しかし、灌漑に利用にするにあたり、水質の問題や安全性、農作物の種類、灌漑の実態把握も重要といえる。そこで、どのような再利用が行われているか、代表的な処理場の処理水利用状況について述べる。

Table 3.1.2 処理水利用がされている処理場と農作物の種類

WWTP	influent flow (MCM)	process	direct reuse area (ha)	Crops											excess effluent flow	
				forest					olive	fodder						non-restricted vegetables
				eucalyptus	oeander	acacia	cypress	other		corn	barley	wheat	alfalfa	Sudan grass		
AS-samra	61.6	p	300												King Talal Dam	
Aqaba	3.0	p	150												-	
Ramtha	0.60	p	50												-	
Ma'raq	0.84	p	25												-	
Madaba	1.20	p	60												-	
Ma'an	0.70	p	7					*							-	
Irbid	3.00	p	0.5					*							Jordan River	
Jerash	0.66	a	-												King Talal Dam	
Abu-Nuseir	0.55	a	0.5												King Talal Dam	
Salt	1.40	a	-												Wadi Shuab	
Kufranjeh	0.80	a	7												Wadi Kafranjeh	
Baqa	3.20	f	-												King Talal Dam	
Karak	0.41	f	3.5					*							Wadi Karak	
Tafielah	0.32	f	1					*							Ghor fifa	
Fuheis/Mahes	0.31		24						under development					-		
Wadi Esir	0.30		15						under development					-		
Wasi Hassan Wadi Mousa Wadi Arab South Amman Nau'r Ghor 1,2,3 Greater Irbid Wadi Shallaleh				Wastewater treatment plant under study and construction												

* MWI HP (www.mwi.gov.jo)

アッサムラ (Khirbet As-Samra) 下水処理場

ヨルダン最大の安定池 (waste stabilization ponds) 方式の下水処理場である。直接再利用に使用されない処理水は、ワジを通りキング・タラル・ダム(KTD)へ流れ込み、ヨルダン渓谷の農地で灌漑用水として利用される。私がリサーチした所、個人の利用として実際には下流で約 1000 件程の農家が樹木に限定とした灌漑用水としてしか利用していないようだ。実験的な試みとしては、300ha にわたり再利用をしている。そのうち 50%がオリーブで成功しており、他の 50%は森林、飼料作物 (アルファルファ) や試験野菜に使用されている。唯一 popular が 2, 3 年で失敗した。やはり処理水の水質と植物が必要としている水質の違いが問題のようだ。また、ナスなどの農作物も実験中であるが、良い成果をあげている。しかし、この処理水は樹木を中心とした処理水転用がなされているのだが、北部エリアのような穀物等の灌漑がされていない事から、今後穀物の生産も可能ではないかと考える。また、ヨルダン国内中もっとも処理水利用量が多い事と、ヨルダン渓谷では農業が可能な土地もあり、灌漑も積極的に行われる動きがあるので、今後大々的な灌漑用水への転用の可能性がある。

マフラック (Mafraq) 下水処理場

安定地方式で、処理水再利用されている地域は 25 ha である。このうち森林に 3 ha、オリーブに 7 ha、後の 15ha は飼料作物に利用されている。

ラムサ (Ramtha) 下水処理場

安定地方式で、処理水再利用は 50ha。また、49ha に飼料作物に利用され、残りは森林への用水として用いられている。このプラントではスプリンクラーが用いられており、人体への影響が理由で畝間灌漑になっている。これは、高濃度の処理水がエアロゾルになり吸引される事と、処理水が広範囲に広がる事が問題とされたようだ。また、元々北部エリアでは地下水量が豊富な事から、灌漑は地下水に頼っており、処理水転用に積極的ではない。また、高地である事から処理場からの汚水運輸が難しいようである。

マダバ (Madaba) 処理場

安定地方式で、処理水再利用地域は 60ha にのぼる。やはり他のサイトと同じく、54ha が飼料作物として利用されており、後は森林とオリーブに使われている。畝間灌漑と地表灌漑が行われているが、最近では栄養塩類による塩害も現れはじめており、新手法による農業の模索がなされている。

カフラジャ (Kufraja) 下水処理場

処理方式は処理水再利用がなされておる他の処理場とは違い、2段階のフィルターを通す散水床方式 (trickling filter system) に沈殿池 (effluent polishing ponds) を組合せた方式を採用している。7 ha に飼料作物が作られており、他の利用はなされていないようである。積極的な再利用がなされていない地域であるといえる。また、沈殿池の防水シートが破損しており、地下水への浸透が気になる処理場であった。そのせいか、周辺では多くの草、木が生えており周囲の環境への悪影響も考えられる。(参照: Fig 3.1.3)



Fig 3.1.3 カフラジャ下水処理場

(浜津 2002/02/12)

アマーン (Ma'an) 下水処理場

安定地方式で、処理水再利用地域 7 ha は主にオリーブが植えられ、一緒にユーカリや、アカシヤ等も混在している。ここの特徴は 0.5ha に大麦が植えられ大成功を収めている。このような農業への転用は少なく、今後も期待できる。しかし、2001 年度の報告は無く、2003 年度の計画も無いようなので、今後の積極的実験に期待する。なお、大麦の灌漑方法は地表灌漑であり、ドリッピングでの実験はまだなされていない。塩害の問題を考えるとこのような施策も重要である。

アカバ (Aqaba) 下水処理場

ヨルダン最南端の汚水処理場。安定地方式を使用している。アカバは観光地であり、観光客の季節変動により、大きく流入負荷が左右される。またアカバはヨルダンで最も気温が高く、夏場の蒸散等により除去性能は安定してない。処理場周辺には森林が設けられており、これらには処理水が散水されている。アカバでも、今後人口増加を考えると、汚水流入量の増加が考えられる事から、処理水利用法を考えないと、観光資源であるコーストラインの汚染に繋がる。今後は、ホテルや観光施設などでの処理水転用を積極的に行う必要がある。

処理水の再利用を行っている処理場付近でも、灌漑用水として積極的に利用をしているとは言えない事がわかった。このあたりに、国の政策が徹底していない事が伺える。また、現在もっとも灌漑がなされている北部エリアでは、周辺地域やヨルダン国内で消費される柑橘類の農業がメインであり、今後の人口増加を考え、穀物の量産が重要になる事から、作付けする農作物の選定も重要になる。それに加えて、汚処理水の水質から安全な農作物の供給に繋がるとは思えない。処理水中や土壌中に残されている重金属などの、ごく微量で人体に影響を及ぼす物質などの測定は、処理施設の設備や就労者の話からすると、詳細に出来ているとはいえない状態であった。水質データの管理も適切な方法で管理されているとは言い難い状況であったことから、関係官庁間で適切なデータのやり取りが行われているかは疑問が残る。また、国の公表データと私が現地集めてきたデータに違いがあったので、今回は私の集めたデータを記述した。灌漑されていた地域が塩害や、地下水の塩分濃度上昇により、実験施設や灌漑されている地域で実験または、農業

が出来なくなっている地域が増えてきたのが、データのズレにつながっている。

ここで、わかったのは処理水をそのまま利用すると、大きな危険があるという事である。実際に硝酸態窒素等の問題は聞かなかったが、高レベルの汚水処理水を農業転用すると、人体への影響も考えられる。また、淡水との混ざりあったものを使用する際も、河川を通して灌漑用水として利用される事から地下水汚染が考えられる。よって処理場から流出される時点で、ある一定のレベルまでの浄化が必要である。また、上記の事から積極的な処理水の再利用はなされていない事がわかった。これについては、ヨルダン政府の政策の曖昧さが垣間見られる。また、この問題には上水や不法な井戸からの盗水問題も大きく関係しているといえる（参照：Fig 3.1.4）。実際にいろいろなサイトを見学したが、積極利用の段階にもいたっていないというのが感想であった。



Fig 3.1.4 不法農園の様子

(浜津 2002/02/16)

3.2 下水処理水の灌漑用水利用に関する条件

では、実際に処理水を積極的に灌漑用水として転用する為にはどのような条件が必要なのだろうか。

アッサムラのような灌漑用水として、古くから積極利用されている所の例から考えてみる。アッサムラ下水処理場からでた下水処理水はキング・タラール・ダムに貯留され、表流水と混ぜ合わさり、希釈された後に、ヨルダン渓谷で灌漑用水として利用されている。また、アッサムラからの処理水は地形の特性から、重力により下流に運び込まれるために、運搬コストが低い事が利用の促進になっているのではと考える。しかし、アッサムラ以外の処理場では、処理水をポンプアップして灌漑地に運ぶ事で処理水のコストが高くなっている事や、土地が粘土質であり土中に水分を確保しにくい事、農業形態も古くからの様式であり効率よく作物を作れない事等により、小規模な下水処理水の灌漑再利用に留まっている。上記のような状況では下水処理水の循環再利用がなされているとは言い難い。今後、処理水利用をするにあたり重要なのは、処理施設の場所と灌漑がなされる場所との関係、現在の処理水の水質が重要であるといえる。また、処理水を転用する場合、ヨルダンのような乾燥地域で、もっとも考えなければいけないのは、塩害の問題である。処理水を再利用した灌漑を行う事により、作物が育たない土地を増やしたのでは意味がない。それを防ぐには、灌漑用水として用いられている地下汽水もしくは、表流水の塩分濃度の把握が必要である。しかし、ヨルダンの多くはアルカリ土壌であり、比較的塩害に強いと言われて

いる。土壌の性質などから考えて、画一的に安全に使用できる塩分濃度を決めるのは危険であり、ヨルダンの農業の前例から判断されるべき問題である。また、これまでの実地検分、調査から農作物の種類が偏っている事に気づいた。処理水の水質に大きく左右される事が考えられる。

次に処理水を転用するために、発生する汚泥の問題を解決しなければいけない。つまり、汚水処理をすることにより生まれる汚泥をどのように管理していくのかという事である。直接的に処理水転用には関係してはいないが、大変に重要な問題である。本実験で用いた処理は、二次処理として使用する事から発生する汚泥は極めて少ない事から、汚泥の問題はあまり考えなくてよい。しかし、従来の処理方法では発生する汚泥の管理は重要であり、地下水系に大きな影響を与えかねない為に、発生汚泥の処理方法について今後関係省庁の検討は必要であると考えられる。廃棄される汚泥の大腸菌数・重金属濃度の把握は必要であり、灌漑への土壌改良剤としての転用やレンガ等への二次的利用についての思索を今後、政府主導により行われるべきである。

以上の事から、処理水を利用するにあたり、いくつかの条件をつける事により、灌漑用水への利用を安全かつ積極的に行えるのではないかと考えた。

- 1) 水処理場と処理水を利用している地域の地形的条件
- 2) 灌漑用水（地下水と表流水）と処理水のコスト
- 3) 農業に使用できる処理水の塩分濃度レベル
- 4) 処理水中の大腸菌数
- 5) 汚水処理場から排出される処理水のレベル
- 6) 下水処理場から近くに適切な灌漑用地がある
- 7) 下水発生量が多い

これらが、灌漑用水への利用に関する最低限の条件である。本論では、政策レベルの問題やコストパフォーマンスや便益費については論じない。本論はあくまで、処理水転用にかんする提案であり、可能性を見出すための論文であるからだ。政策と建設コスト等は複雑かつ慎重に議論されるべき問題であり、今後の研究に期待する。

3.3 適地選定

では、実際にどの処理場を使い、どこで灌漑を行うのか。上の章で述べた条件に従い、適地を選定する。ヨルダン国は南北に長い国だが、実際に農業が行われているのは、北部の高原と、ヨルダン渓谷である。はじめに北部エリアの節水を目的とする事から、北部エリアでの適用を考える。本来、北部エリアでは年間 400mm ~ 500mm の降雨が有る地域であり、地下水も豊富にあった。そのため、合法・不法に掘られて井戸からの灌漑が多くなされてきた土地である。北部エリアでは都心部をはずしている事から人口も少なく、排出される汚水量も少ないために、莫大な資金をかけて、ポンプステーションを作ったとしても、処理水量が少ない事から十分な灌漑用水の確保には至らない（参照：Table 3.1.2）。また灌漑がされている地域は高地にあるために、下水処理施設が灌漑地帯より低い場所にある事が最大のネックになると考えられる。処理場からポンプアップをしなければ利用できないという事は、コストが上昇する事を意味している。本来、井戸水による農業をしてきた地域である事から、再び不法な井戸や上水の盗水を行い、処理水の利用に影響が出る事が考えられ、北部エリアでの処理水転用は難しいと考える。

次に南部エリアを考える。ヨルダン渓谷の南部エリアでは元々多くの処理施設からの下水が流

しこまれてきた。ヨルダン渓谷南部には死海があることから、わかるように、運搬コストがかからず重力により処理水を運べるというメリットがある。また、昔から処理水利用が多くなされてきた土地柄であり、処理水使用に抵抗が少ない事も大きなメリットである。それに加え、国内最大の下水処理量をほこるアッサムラ下水処理場からの流入もあるため、今後の流出水増加を考慮すると、積極的な灌漑用水への転用が可能である。また、水質上問題となっている BOD、塩分濃度等はザルカ川で一時希釈され、キング・タラール・ダム (King Talal Dam : KTD) で第二の汚水処理が進むことによりかなり希釈される事からこの問題は解決できると考える。また、地下水を灌漑用水として使用した場合でも、塩類集積に関しては、土壌の状態や排水条件により異なるが、一般的にヨルダン渓谷で使用している地下水の塩分濃度 (TDS 値で $500\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ から $1000\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 程度) と、下水処理水の塩分濃度 ($700\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ から $1,200\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 程度) の間に大差ない事が現地での調査で明らかになったことから、問題はないと思われる。しかし、実際にはアッサムラの現在の水質は決して良いものではなく、処理水が河川を汚している事は確かである、河川に流入する前に、水質改善しなければ、灌漑用水利用の前に周辺環境の汚染や、地下水汚染につながってしまう危険性もある。しかし、流入量と運搬コストの問題は解決した。これにより、十分な灌漑用水を確保するにはアッサムラの処理水を転用し、地下水の大替水源として望ましいと考えられる。そこで、本論は処理水適用地をヨルダン渓谷南部とし、アッサムラからの処理水の再生利用について、転用の可能性について述べる。

3.4 アッサムラ下水処理場の現状と、ヨルダン渓谷の農業

適地として、ヨルダン渓谷を選定したのだが、実際にはどのような農業が行われ、使用される水配分はどうなっているのだろうか。ヨルダン渓谷は南北に約 120km に広がっている。農業が行われている地域は 33,000ha といわれており、農家は一戸あたり 3 ha の耕地を所有しているといわれている。平均 200mm 以下の降水量で、蒸発や地下浸透により 1600mm/年は使用できない。ヨルダン渓谷では高原地域以外のほとんどの場所で灌漑農業が行われている(参照: table 3.4.1)。ちなみにヨルダンを挟んだ対岸では、イスラエルの農家が農業を行っているが、ヨルダンよりも大規模であり、青々としていた。イスラエルは豊富な地下水と、ヨルダン川の源流となるティベリアス湖からパイプラインを引き大々的に農業を行っているが、ヨルダンではヨルダン川の流量が低下してから、同じく源流であるヤムルーク川(Yamruk River)からの水に半分以上頼っている。ヤムルーク川は元々水量も少なく、年間 50MCM 取水している。また、KTD から 50MCM、ティベリアス湖(Lake Tiberias)から 50MCM がキング・アブドゥラ運河を経て流入してくる。また、地下水から 50MCM、その他各ダムから 50MCM 取水し、合計 300MCM が使用されている。

Table 3.4.1 ヨルダン渓谷の農業

	North Shunna	Deir Alla	South Shaunna	Total
人口[人]	82620	48110	36775	167505
就農人口[人] (比率[%])	3810 (4.6)	5000 (10.4)	2557 (7.0)	11367 (6.8)
面積[ha]	24300	24260	27260	75820
耕地面積[ha]	13565	8352	11000	32917
灌漑面積[ha] (比率[%])	10000 (73.7)	8352 (100.0)	8000 (72.7)	26352 (80.1)
農家1戸の平均所有面積[ha]	4.6	3.3	8.1	4.8

* MWI HP (www.mwi.gov.jo)

では、アッサムラ処理場の現状はどうなっているのか。アッサムラ下水処理場はヨルダン最大の下処理場であり、200ha という広大な敷地全体が下水処理場という、日本では考えられない施設である。実際に目にしたが、大きな池が広大な砂漠の中に忽然とある感じである。池は全部で4つあり、それぞれが沈殿地である。簡単に説明すると、4つの沈殿地を自然滞留させ、そのうちに日光と微生物の働きにより浄化する仕組みである。アンマン、ザルカ等の国内人口が最も集まる都市の汚水を一括処理している。現在の流入量は約 170,000m³/day であり、設計容量が 68,000MCM で、実に 2.5 倍もの流入がある。現地視察したときは、正確には把握しておらず、JWA という官庁が独自に管理をしていた。また、現地調査の期間が雨季にあたり、流入量も増加していたのに加え、沈殿地のうち 1 つが汚泥の浚渫中であったことから、かなり水質は悪化していた。普段は、設計容量を大幅に超えることから、滞留日数をコントロールし、あふれないようにしているようだ。最も流入量が多い時では、40 日の滞留時間を 18 日に短縮し、そのままザルカ川に流してしまっている。これだけ、雑な処理をしていれば当然周辺環境に影響もある。川からは実際に悪臭がし、泡立っていた。しかし、ようやくアメリカの The United States Agency for International Development(USAID)による BOT プロジェクトにより新しい施設が建設される予定である。新しく、270,000m³/day の設計容量であり、アンマンからの新パイプラインも建設中である。建設コストは\$79.5 million にも登る大プロジェクトであり、現在使用されていなかった、浚渫中の沈殿地の上に建設される予定である。従来のシステムより遥かに高性能であり、キャパシティも大幅に増大するのだが、ヨルダンの土地や気候にあった処理システムとは言い難い。

従来までの方式は広大な土地と、太陽を利用した完全なエコサイクルをなしていた処理システムであった。流入負荷の増加に伴い、機能の半分も果たせなくなったとはいえ、丸々つぶすのには、コストや工事時に発生する余剰汚泥処理の問題等、環境に与える負荷も無視できないといえる。それに比べ、完全オートメーション化された処理プラントでは、消費電力や維持管理、故障時の対応など、現地の人間が長く使うにはあまりにも配慮に欠けたものと感じられる。また、ヨルダンでは原油を産出しない事から、アラブ諸外国からの輸入に頼っている。今後の中東情勢や国内の電力ロスによる損失問題を考えると、停電の多いこの地域一帯での、安定した汚水処理にも影響があるのではないかと考える。また、ヨルダンの上水道損失補填時のように、今後このプラントを維持するために、政府開発援助に頼りきりの体質を助長させる要因ともなりえる。

そこで、自然の力を利用したアッサムラの処理システムと、四万十コンセプトに基づいた固形廃棄物を用いた接触材による生物処理による処理水を利用する事を考えた。アメリカが基本設計をした新プラントとは違い、既存のアッサムラ処理場を残したままの汚水処理のプロセスである。その為に実際にどのような経過をたどって、汚水はヨルダン渓谷まで行くのかを把握する必要があり、どのような処理工程により汚水処理がなされているかも重要となる。

アッサムラ下水処理場

アッサムラ処理場は4過程の沈殿地と塩素処理地は、それぞれ沈殿地の上澄みが次の池へ重力に任せて滞留させて行くシステムを取っている。自然の力だけを用いた処理であり、まったく電力を使用しないシステムである。現地では、はじめの沈殿地ではさすがに強烈な匂いがしたが、滞留していくごとに匂いも弱くなっていった。不十分な処理とはいえ、アンモニア等の窒素化合

物等の除去は行われているようであった。最終池では、大量の塩素殺菌がなされていた。不十分な処理により取り除かれなかった、硝化窒素などの化学物質をはじめ、塩素により発生するトリハロメタンの問題も懸念される。しかも、不十分な処理のまま河川へと流すと下流域にまで影響をもたらす事から、それを抑制するために多量の塩素で殺菌・不活性化を行うという悪循環に陥っている。また、現地調査で気づいた点なのだが、下水処理場より発生した汚泥の処理問題の事だ。汚泥は処理場内に無造作に廃棄されていた。汚泥が廃棄されている場所周辺では、植物が多く生えており、適度に水分を含んだ汚泥による水分と栄養塩類の供給がある事が予想される。しかし裏を返せば、それら複数の植物が育つという事は、豊富な有機物・栄養塩類・重金属を多く含んでいる事を意味し、汚泥の重金属に対する処理を何もしていないアッサムラでは、下水処理場周辺での、重金属汚染の拡大が考えられる。現在は流出水質だけは明らかにされているが、発生する汚泥に関しては調査されていないとの事だった。その事から、土壤に含まれる重金属値と、汚泥中に生える植物より、重金属の濃度や種類の特定が必要だと感じた。また、一般排水の問題だが、法律により規制を設けたといっても、個人が倫理をもって行う事であり、実際に多くの工場から下水が流されているの目撃すると、環境教育の大切さについてかんがえさせられた。今後は水質浄化に加えて、これらの問題に対する対策も必要であると考えます。

処理水の行方と水質

塩素殺菌を受けた処理水は処理場を抜け、ザルカ川を通過して、KTD を経てキング・アブドラ川 (KAR), キング・アブドゥラ運河 (KAC) へと流れ、ヨルダン渓谷にまで運ばれる。その間、水質は各省庁により検査がされており、環境庁と水灌漑省により行われている。両省庁とも、直接訪問する機会がなく、実際にどのような方法でサンプリングし、計測しているかは聞けなかった。だが、アッサムラ下水処理場から KTD までの水質は、WAJ (Water Authority Jordan) の管轄、KTD から下流は JVA (Jordan Valley Authority) の管轄であった事から、As-Samra の流出水と、KTR への流入水の水質データを手に入れる事ができた。(参照：table 3.4.2)

Table 3.4.2 Zarqa 川の水質

Location	Water Quality (as mg·l ⁻¹)					
	TDS	TSS	BOD5	COD	TP	TN
As Samra inflow	1228	501	697	1634	15.5	103
As Samra outflow	1196	111	124	455	20.0	107
KTR inflow	1318	84	51.6	141.4	9.0	59.4
KTR outflow	1143	20.4	10.2	38.2	4.8	26.8

* MWI HP (www.mwi.gov.jo)

灌漑は KTD より、上流での処理水利用は主に樹木、牧草に限られ、KTD より下流では野菜等の灌漑が行われている。ザルカ川上流部では不法(無料)に灌漑用水として利用していた。実際は下流で灌漑用水を買うのだが、大体 10fils/m³ (1JD = 1,000fils) 程度の値段で売られており、意外にコストは安かった。しかし、上流部では処理水を容易に盗水出来る事から、無作為に灌漑用水へと利用され、実際は KAC の水が途絶えてしまう事もしばしばある。また、処理水利用の方法も、対象作物に限定されているとは限らない。農家が勝手に灌漑用水として使用してしまう事から、実際に処理水が何に使用されているのかは、不明な点が多い。

King Talal Dam

ヨルダン最大のダムで、高さ 108m、設計容量 89MCM のロックフィルダムである。現在のダムの利用目的は 6 メガワットの小規模発電ダムなのだが、実際はほとんど稼動する事がない。降雨がないこの地帯では、ザルカ川からしか流入がないため流量調節の必要もない。私が訪問した 2 月中旬は雨期であり、近年では最も降雨があった年であったのに関わらず、設計容量半分以上の貯水率で、約 40MCM にしかなかった。8 月の少雨時にはわずかに貯水率 10% にしかない。今年は降雨量が多かったが、近年は平均して少雨傾向にあることから、雨期後の貯水率はここ 4、5 年では 25% 程度でしかない。このことは、ザルカ川の水質悪化の原因に繋がっている。降水量の低下は川の流量低下に加え、アッサムラ下水処理場からの処理水は増加している事から、希釈される割合が減り、水質悪化の原因となっている。また、実際には電力の発電も殆どされておらず、貯水した水は使用される事なく、貯められている。

King Talal Dam (KTD) では、ユニークな現象が起きている。このダムが持っている第二の安定地とも呼べる機能により KAR の水質は大きく改善されている。アッサムラ下水処理場より流れ出た処理水は、最終的に KTD に流れ着くのだが、放流される量が大変少なく、貯水されている間に、大きな安定地帯として働いているようである。これにより、現在でも下流の農家が灌漑に利用している。(参照: Fig 3.4.2)



Fig 3.4.2 King Talal Dam

(浜津 2002/02/13)

以上の事より、アッサムラ下水処理場の概要と処理水の水質と流れはわかった。実際に処理水を転用するにはまだまだ汚水処理をしなければいけないレベルである事もわかった。実際に処理水を転用し、地下水源も同時に守っていけない事を考えると、より一層二次処理、三時処理を行う必要がある。そこで、次章ではどのように、KTD からの水を処理し、処理水の灌漑用水利用を行っていくかの概念について記述する。

3.5 下水処理水再利用案

下水処理水の再利用の課題は、水質問題の他に、送水費用が問題であり、これは処理水の料金に反映されてしまうために、最も重要と考えられる。首都圏からの下水処理は自然流下による送水が可能なヨルダン渓谷での再利用がかるうじて経済的妥当性を持つと思われるからだ。したがって、地下水揚水削減が求められている高原地域において、地方下水処理場からの下水処理水を処理場周辺で経済的に活用することはできるものの、大きな節水にはつながらないと考えられる。したがって、本論で明らかになった、実験値と安定した流入量を考えて、ザルカ川から KTR への流入する付近に施設を設置し処理水の灌漑利用をすると仮定する。流入水の施設への流入と、滞留は重力により行われる事から、比較的容易な維持管理システムを備えた施設の導入が可能である。また、処理水もそのままヨルダン渓谷へと放流可能な事から、運搬にかかるコストも軽減される。

また、処理水利用に関する使用住民の意識だが、実際に処理水利用が行われているこの地域では、比較的容易に処理水利用の考えに賛成されている事も現地調査時に確認済みである。しかし、すべての農作物に対する使用ではなく、野菜栽培に対しての使用は反対派の意見は今でも多くある。それは、処理水を昔から使用してきた為に、処理水転用の危険性も把握しているからだといえる。実際に多くの処理水の利用法は果樹園や飼料栽培が多かった事も、これまでに述べてきたが高原地帯での地下水揚水の削減を行う上で、野菜栽培は大きな役割をになう。従来までの希釈しない下水処理水の再利用とは異なり、新たな接触ろ材を使用した場合、KTR の水質から考えて BOD で $2 \sim 5 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 、TN で $6 \sim 15 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 、TP では最低でも $7.3 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 未満の除去率は期待できることから、十分に農業用水として転用可能であるため、下水処理水の再利用にあたって農家にアピールしていくことも必要だと考える。

3.6 考察

下水処理水の再利用は、水資源・環境保全の重要な課題であり、実施の条件が整い次第、速やかに実施されるべき問題であることがわかった。ヨルダン全土での処理水の利用は想像以上に少なく、また灌漑に転用されているものでも、限られた種類でしか使用されていないことがわかった。また、おおくの処理場の水質は処理水として可能な水質基準を超えるものあり、今後水質改善が行われるか、新たな手法の導入による二次処理、三次処理が必要な事もわかった。

実際に新たな処理場導入に向けての試みを試みしたが、下水処理水再利用にかかるコストや、現在の灌漑用水との比較、建設コストや、各種汚水除去の設計値の算定など、多くの問題を課題に残してしまった。適地選定はしたが、実際に妥当なものであるかの評価も今後の課題であり、経済的な妥当性と施設が持つ除去性能と、処理水再利用をどのくらいできるかという事も不明のままである。

3.7 まとめ

農業への処理水転用の利点は、循環・持続可能性であることはわかった。これにより、代価水源の確保へとつながる事はわかった。地下水源は過剰揚水で削減の必要があることから、表流水も容易に得ることが出来ないなか、処理水の再利用をもう一つの水源として使用することにより、地下水や環境への影響を軽減させる事も可能であると考えられる。しかし、課題も多くあり、現在の処理水の水質は適当とはいえず、作物が育成可能かということだけでなく、高レベルの処理水が灌漑用水として広まったとき、人体への影響もあるために、農作物への品質管理も行う必要があると思われる。また、下水処理場のワジの近くに灌漑用地が無い場合、輸送コストがかかることから、農場の中に掘られている井戸と比べると、不平等なアクセスビリティや処理水の値段とのギャップが生じ、普及できる地域が限定されてしまう。また、育てている作物や農業形態によっても、処理水の導入に制限がされてしまうため、処理場の位置と農業地域と作物の分布について把握した上での計画が必要となる。

一番の問題と思われるのは、やはりコストの問題なのだが、農業用水は意外に安いために、処理水を普及させるためには、処理水の値段と輸送にかかるコストをさげなくてはならない。この問題の解決は使用する農家の理解と政府の政策によるものが大きい。

謝辞

本論文を作成するにあたり、主査としてたびたび長時間に及ぶ議論に御付き合いただき、また情熱あふれる御指導と御教示を賜りました村上雅博教授、副査としてご多忙中にも関わらず、貴重なご意見を頂きました、渡邊法美氏、数々の手助けや研究での悩みの相談から雑談までお世話になりました、荒木英昭氏に深く感謝の意を表します。御多忙中にも関わらず数々の貴重な御指導、御助言を賜りました高知工科大学大学院博士課程在籍の福原隆一氏、大原健二氏にこの場を借りて深く感謝の意を表します。

また、実験材料提供をして頂きました株式会社地研のみなさまにあつく御礼申し上げます。現地調査、見学と多大なる御支援を賜りました国際協力事業団シニアボランティアの上田恵一氏、国際協力事業団 UFW 専門家の高橋健一氏に厚く御礼申し上げます。貴重な資料、現地のデータ、施設説明をいただいた、NCARTT Dr.Samir KHALIFAH 氏、Musa AYESH 氏、Jordan MWI Qunqar EDWARD 氏に厚く御礼申し上げます。

本論文作成にあたり、いろいろお世話になりました先輩の五艘隆志氏、馬淵泰氏、同輩の佐藤博信氏、山岡大洋氏、米田周平氏、大久保圭氏、後輩の安里哲平氏、斉藤由紀氏をはじめとする村上研究室、建設マネジメント研究室の皆様にご心より御礼申し上げます。

6年間の大学生活を公私共に支えとなってくれた豊田勇氣氏、川上悦一氏、青山卓司氏にご心よりお礼申し上げます。

最後に今まで育ててくれた両親にご心より感謝し、御礼申し上げます。

引用・参考文献一覧

- ・ 味埜俊，1998，生物学的りん除去の微生物学的代謝機能とその工学的意義
- ・ 市岡高男，佐来栄治，加藤進，澤智恵，木村俊介，菅原庸：微生物の機能を利用した水質浄化 - 担体付着微生物群集による有機物分解および窒素除去，三重県環境科学センター研究報告書
- ・ 加藤進，山下晃，岩城誠二，高橋正昭，2000，他自然型河川作りに関する研究 - 環境に優しい吸着材を用いた脱リン法．三重県保健環境研究所報：p7-8
- ・ 高知県自然循環方式水処理技術研究会，1996，四万十川方式報告書，高知県自然循環方式水処理技術研究会出版
- ・ 中島重旗，加納正道，小島義博，金子好雄，1994，水環境工学の基礎，森北出版：p123 - 183
- ・ 松尾友矩，1997，水質環境工学，Metcalf & Eddy.,inc
- ・ 村上雅博，2002，現在用語の基礎知識 2002．自由国民社：巻末見開き
- ・ 山崎正弘，2001，中東戦争全史，学研
- ・ ミラクルソル協会，2002，ミラクルソル工法概要集，ミラクルソル協会：p1-2
- ・ 2ch HP(www.2ch.net)
- ・ Albulbasher Shahalam, Bassam M. Abu Zahara, A. JARDAT: Wastewater Irrigation Effect on Soil, Crop and Environment, 1997
- ・ CIA HP (<http://www.cia.gov/cia/publications/factbook/>)
- ・ Hironobu SATOU, Norihiro HAYASHI, Isao SUZUKI, Kenji INOUE and Masahiro MURAKAMI : Eco-Engineering Application in Reclamation of Treated Wastewater and Constructed Wetland
- ・ MWI HP (www.mwi.gov.jo)
- ・ NCARTT HP (<http://www.ncartt.gov.jo>)
- ・ J. Vymazal, H. Brix, P. F Cooper, M. B. Grenn, R. Haberi : Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Europe , Backhuys Publishers , 1998
- ・ JICA : Proceeding of international Symposium on Environmental Pollution Control and Waste Management , JICA
- ・ Mahammad Taha Hanbali : Water Use, Reuse, and Quality in The Jordan Valley
- ・ Masahiro Murakami: Managing Water for Peace in the Middle East, UNUP, 1995
- ・ Muhanmmad Shatanawi and Manar Fayyad: Effect of Khirbet As-smura Treated Effluent on The Quality of Irrigation Water in The Central Jordan Valley, Pergamon, 1996
- ・ Sherwood C. Reed, Ronald W. Crites, E. Joe Middlebrooks . 2001 . 自然システムを利用した水質浄化 ~ 土壌・植生・池などの活用 ~ . 技術堂出版：p2-9 . 17-41 . 59-129 . 173-278 .

Appendix

1. 経過時間別にみた、各ろ材の水質結果

表 A - 1 中空チューブの平均除去値

経過時間	BOD (mg・l ⁻¹)	COD (mg・l ⁻¹)	全窒素(T-N) (mg・l ⁻¹)	全リン(T-P) (mg・l ⁻¹)
0	7.67	26.0	28.2	11.5
1	7.35	19.7	27.4	10.6
2	7.17	13.2	25.4	9.9
3	7.08	12.2	20.3	9.6
4	7.45	15.7	21.5	9.2
5	6.61	9.4	13.1	8.6
6	6.30	8.8	10.5	8.1
7	5.96	7.8	8.1	7.6
8	5.54	7.4	7.5	7.4
9	5.22	6.8	6.4	7.3

表 A - 2 貝殻 5%含有の発泡骨材の平均除去値

経過時間	BOD (mg・l ⁻¹)	COD (mg・l ⁻¹)	全窒素(T-N) (mg・l ⁻¹)	全リン(T-P) (mg・l ⁻¹)
0	7.67	26.0	28.2	11.5
1	7.52	22.2	20.2	5.2
2	7.48	20.4	19.1	5.1
3	7.44	20.2	18.2	4.8
4	7.50	21.0	19.5	4.7
5	6.17	18.2	15.7	4.6
6	6.02	17.6	14.1	3.8
7	5.49	17.0	13.3	3.5
8	5.42	16.6	10.5	3.3
9	5.10	14.4	8.0	3.1

表 A - 3 貝殻 10%含有の発泡骨材の平均除去値

経過時間	BOD (mg・l ⁻¹)	COD (mg・l ⁻¹)	全窒素(T-N) (mg・l ⁻¹)	全リン(T-P) (mg・l ⁻¹)
0	7.67	26.0	28.2	11.5
1	6.51	25.8	27.2	7.5
2	5.81	25.2	26.7	7.0
3	4.55	24.4	25.4	6.7
4	5.23	25.2	26.2	6.1
5	2.96	23.6	23.9	5.9
6	2.88	23.8	20.3	5.7
7	2.71	23.2	18.8	5.3
8	2.53	22.4	16.9	5.1
9	2.39	22.0	15.1	4.5

2. ヨルダンの処理場の水質と、農業利用の水質基準値

($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)

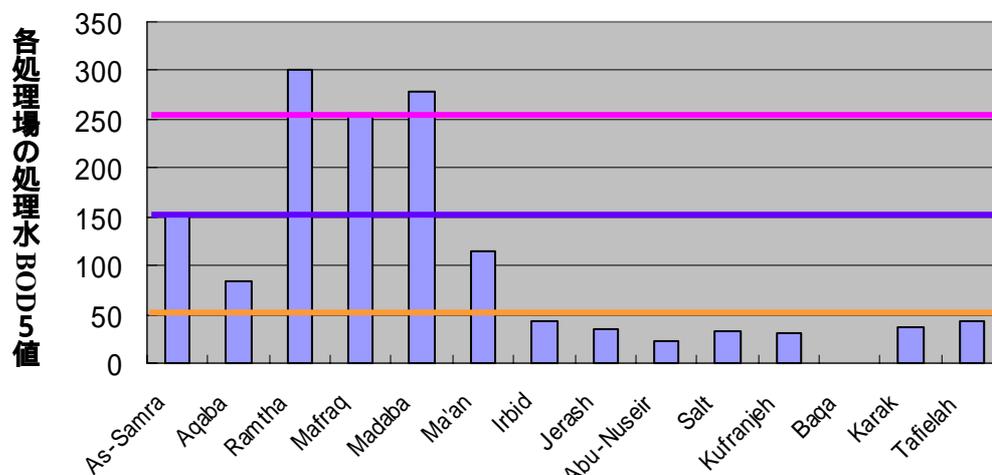


図 B - 1 各処理場の BOD₅ 値

($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)

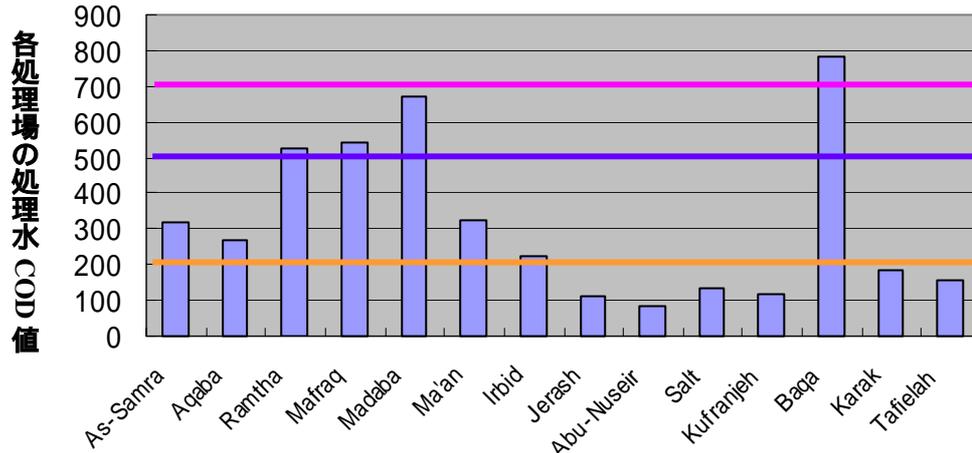


図 B - 2 各処理場の COD 値

($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)

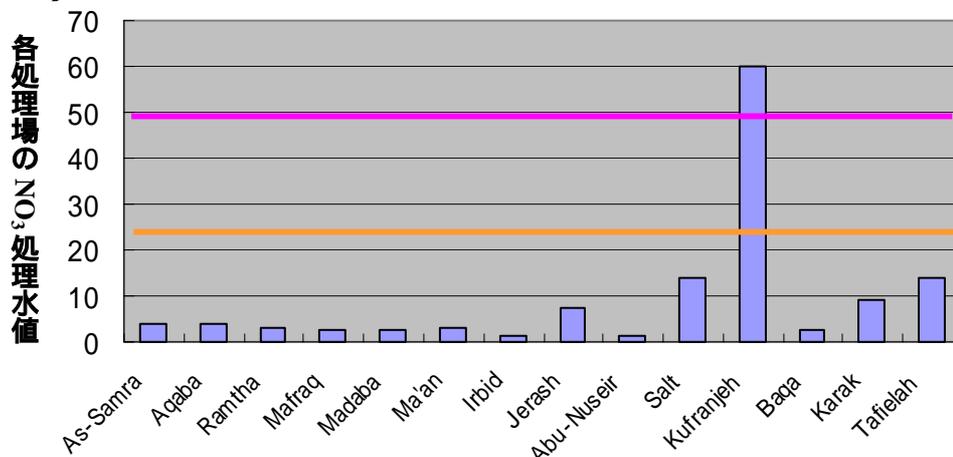


図 B - 3 各処理場の NO₃ 値

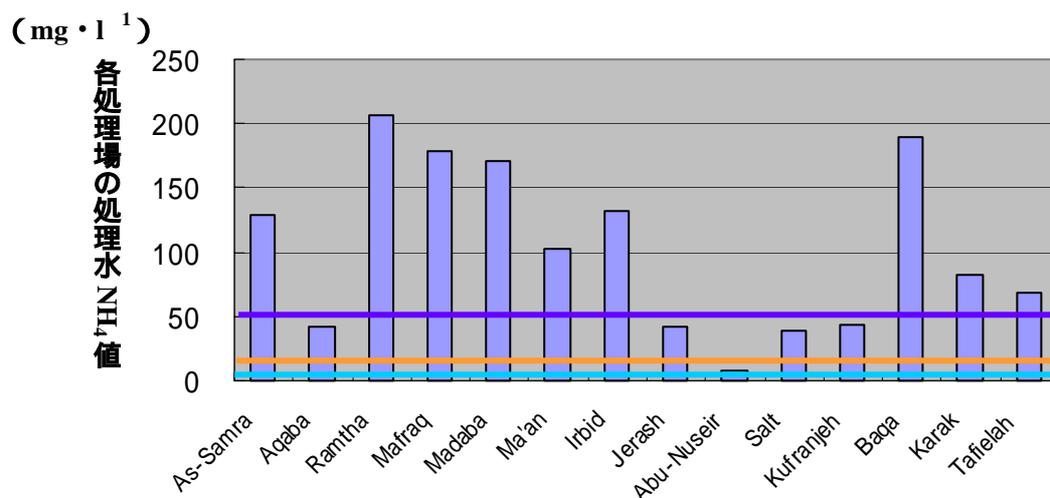


図 B - 4 各処理場の NH₄ 値

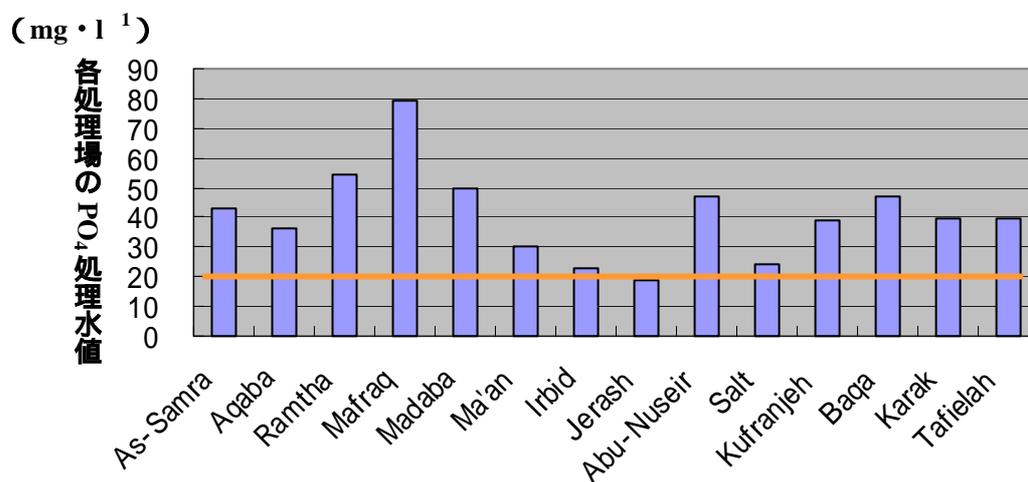


図 B - 5 各処理場の PO₄ 値

BOD ₅ , COD, NO ₃ の水質基準	
	Cooked Vegetable
	Ripped Tress & Industrial Products
	Discharge to Flo wing and accumulated water
	Recharge aquifer
	Irrigate Parks
	Irrigate Fodder

NH ₄ , PO ₄ の水質基準	
	Discharge to Flo wing and accumulated water
	Recharge aquifer
	Fish
	Irrigate Parks