

乾燥地域における再生水利用システム
の構築支援手法に関する研究

2019年1月

鬼木 哲

目 次

第1章 序論	1
1.1 はじめに.....	1
1.2 本研究の背景.....	5
1.2.1 人口の増加.....	5
1.2.2 水の偏在.....	5
1.2.3 乾燥地域.....	6
1.2.4 水需要量の増加.....	8
1.2.5 水ストレス.....	9
1.2.6 再生水需要の高まり.....	10
1.2.7 持続可能な開発目標と本研究の関わり.....	12
1.3 本論文の構成.....	14
第2章 再生水システムの実際と計画論的課題	19
2.1 はじめに.....	19
2.1.1 再生水に要求される水質.....	19
2.1.2 再利用水質基準.....	20
2.1.3 下水水質及び農作物の選定.....	21
2.2 下水道計画の策定手順.....	24
2.2.1 一般的な下水道計画.....	24
2.2.2 再生水利用を考慮した下水道計画.....	25
2.2.3 乾燥地域での下水道整備状況.....	26
2.3 本研究で着目する計画論的課題.....	27
2.4 再生水システムの導入可能性に関する予備的検討.....	28
2.4.1 既往の研究.....	28
2.4.2 対象地域の水環境.....	29
2.4.3 持続的な再生水システムの検討.....	30
2.4.4 最適な再生水利用・処分システムの検討.....	37
2.4.5 最適な再生水システム.....	47
2.4.6 上水道料金変動による感度分析.....	49
2.4.7 まとめ.....	50
第3章 再生水利用を考慮した下水処理施設の立地計画	54
3.1 はじめに.....	54

3.2 本研究の考え方	54
3.2.1 実際の下水处理における段階的処理	54
3.2.2 既往研究と本研究の枠組み	55
3.2.3 下水処理施設の立地場所	55
3.3 下水処理施設整備に係る数理最適化モデルの構築	57
3.3.1 本研究における前提条件と考え方	57
3.3.2 二次処理過程における費用関数と制約条件	58
3.3.3 高度処理過程における費用関数と制約条件	59
3.3.4 下水処理施設の数理最適化モデルの定式化	61
3.4 数値計算	63
3.4.1 条件設定	63
3.4.2 再生水需要に伴う下水処理施設の最適立地場所の変化 (ケース 1)	64
3.4.3 再生水需要に伴う下水処理施設の最適立地場所の変化 -建設・運転維持管理費用係数半減- (ケース 2)	66
3.4.4 再生水需要に伴う下水処理施設の最適立地場所の変化 -建設・運転維持管理費用係数 1/10- (ケース 3)	68
3.4.5 下水処理施設配置のための数理最適モデルの有効性	70
3.4.6 本研究の課題	70
3.5 まとめ	72

第 4 章 地域経済分析に基づく再生水導入施策の効果の計測～農業部門を対象として～74

4.1 はじめに	74
4.2 本研究の考え方	74
4.2.1 問題意識	74
4.2.2 既往研究のレビュー	75
4.2.3 本研究の分析方法	76
4.3 モデルの定式化	77
4.3.1 農作物生産量を求めるための線形計画モデル	77
4.3.2 波及効果推計のための産業連関モデル	79
4.3.3 線形計画モデルと産業連関モデルの接続	80
4.4 事例分析	82
4.4.1 分析対象地域及び分析シナリオ	82
4.4.2 農産品品目別生産量の推計	84
4.4.3 産業連関分析による波及効果の推計	88
4.4.4 考察	89
4.4.5 対象農作物変更による感度分析	90
4.5 まとめ	91

第 5 章 結論	93
----------	----

謝辭

第1章 序論

1.1 はじめに

人が生活する上で、水は不可欠なものである。一見、水が豊富に存在するように見える地球であるが、その水資源は大きく偏在しており、ほとんどが海水で直ちに生活に利用できるものではない。人がアクセスしやすい利用可能な水は全体の僅か0.01%しかない¹⁾。一方で人口は増加し続けており、2050年には97億人に達すると予測している²⁾。また、気候変動の影響を受けた干ばつなどの地球規模で砂漠化が進行しており、人口増加と共に今後、水ストレスの高い国や地域が拡大することが予想される。

特に乾燥地域では、人が住むための水源は限られており、表流水はほとんど存在しない。主な水源は、地下水または海水淡水化に依存しているものの、常に水不足に直面している。そして地下水過剰汲み上げの結果、その枯渇だけでなく、特に沿岸部では海水の浸入を許し、汚染の問題が生じている。一度汚染された地下水は、水質を改善するには時間と費用がかかり、不可逆性が高い。一方、海水淡水化の採用に対しても施設建設費と運転維持管理費がかかり、財政的な負担を強いることになり、また、CO₂排出量も増大することとなる^{3), 4)}。

また、乾燥地域では、人口増加による生活用水の確保だけでなく、産業を主に農業に依存している場合、農業用水のためにも大量の水を必要とすることから、新たな水源開発、水資源の安定的な確保やマネジメントは今後ますます重要な問題となる。

一方、生活用水の使用量増加は発生下水の増加を招き、下水の未処理での排水は、限られた水源、特に地下水の汚染を引き起こす。そこでインフラ整備として、公共用水域の水質保全、生活環境の改善を目的とした下水道施設が整備されている。都市部からは、絶えず汚水が発生しており、この下水を処理することで一定量の処理水を排出している。下水処理水の排出量は安定的で、季節変動に大きく左右されることはないことから新たな水源として着目し、利用することができる。下水処理水の再利用（再生水の利用）である。例えば、米国カリフォルニア州では水不足解消や河川・海洋などの水環境保全の観点から、農業用水や工業用水、修景用水など幅広い用途に再生水を供給している⁵⁾。また、地理的に水資源を他国に依存せざるを得なかったシンガポールでは、水の自給率向上を目指して再生水を導入し、研究開発の末に誕生した高度処理水「NEWater」は、半導体工場など工業用のほか、一部は貯水池にも供給されている⁶⁾。このように、再生水を有効に利用することは国や地域が抱える水資源問題の解決の糸口となり、また、環境負荷軽減にもつながる。

水不足に見舞われる乾燥地域において、再生水は現状の上水の代替の可能性がある、潜在水需要が高い用途に使用することができる。下水処理水を再利用する際にその利用用途を選定する必要がある。上水は、生活用水（飲料水）を除くと主には農業や緑地への散水に使用されており、その量は大きい。一方で下水処理水であればどの用途

にも使用できるわけではなく、それぞれ用途に応じて適用水質基準が設けられている。農業用水及び散水用水への適用にも一定の水質は要求され、これを満たさない場合は植物の枯死や農作物の減産、壊滅、また人への健康被害を招く可能性もある。よって要求される水質基準を満たすためには、その要求水質に応じて高度処理導入を検討する必要がある。

ここで考えなければならないのは、水不足の状況下といえども当然のように下水処理水に高度処理を導入して再生水を利用するわけではない。高度処理を採用することは、施設建設とその運転維持管理に費用がかかるばかりでなく、再生水利用のための配水管、配水池及びポンプ場などの配水施設整備も必要となる。一方、再生水利用ではなく、下水処理水の処分を選択した場合にも、排水のための放流管などの施設が必要であり、その建設費及び運転維持管理費が発生する。

乾燥地域においては、人口増加で都市化が進むなか、沿岸地区から内陸部へ広がりを見せている。新興都市ではインフラ整備により下水道整備も計画され、下水道整備の第一の目的である公共用水域の保全及び生活環境の改善に加え、有限水源である地下水の枯渇・汚染防止とその保全も目的となる。加えて、下水処理水を新たな水源と位置づけ、再生水の利用計画を立案することができる。そこで本研究では、乾燥地域の新興都市をケーススタディとして、下水処理水を再利用することが経済的に有利か、処分（排水）と比較をすることで再生水利用の有効性を確認するため、再生水システムの導入可能性について予備的検討を行う。

再生水の利用を方基本針としたうえで、その利用に当たり実のところ開発途上国やインフラ未整備地域では、下水道施設が未整備である地域が多い。上水道施設は、人々の生活や都市部での経済活動で必要不可欠なものであるため、下水道よりも先行して整備される。その後、公共用水域の保全等を目的として発生した下水を処理するために下水道施設を整備する。よって下水の処理を主目的とすることから、二次処理施設を先に建設するのが一般的である。通常、発生した下水は、極力、ポンプなどの動力を使用せず、自然流下方式で収集することから、二次処理施設は低地に建設されることが多い。しかし、下水処理水を再利用する際に、水需要先が必ずしも下水処理場の下流側、すなわち自然流下で配水できる位置にあるとは限らない。むしろ水需要は、下水が発生する都市部で高いと言える。そこで低地で発生した二次処理水を再利用のために高度処理後、ポンプにより再び高地へ移送（送水）しなければならない。これは自然流下による下水収集の利点（下水収集の省力化）を損なうものである。

そこで下水道計画当初より下水処理水の再利用を計画として含め、再生水のニーズアセスメントを前提とした上で、経済的となる二次処理施設と高度処理施設の立地、すなわち最適な処理施設配置計画の支援の構築を提案する。

下水処理水の再利用の可否、最適な下水処理場の位置の決定支援について述べてきたが、下水処理水を再利用した場合、はたして経済的な利点はどの程度あるのか、その効果について計測する必要がある。

水需要が大きく、かつ経済的効果が期待できるのは、再生水を農業用水に用いた場

合と考える。再生水を利用する際、まず、農作物の選定が重要な要因となる。下水処理水には塩分濃度が高い場合が多い^{7), 8)}。また、処理水質にも品質の程度があり、二次処理水と高度処理水では再生水の水質が異なる。二次処理水では生食する耕作物（野菜など）には不適である。一方で、果樹などの樹木には適用できる。そこで農作物目選定の留意点は、1)塩分耐性が高いこと、2)二次処理水か高度処理水かで品目が異なること、3)現地の特産品であること、が挙げられる。

次に農業用水を再生水で代替・補完した場合、農作物生産額にどの程度、経済的波及効果が期待できるか、その計測方法を提案する。そこでマイクロレベルでは農産品品目別の生産量を最大化することとし、そのアウトプットをマクロレベルで地域経済波及効果を計測する。

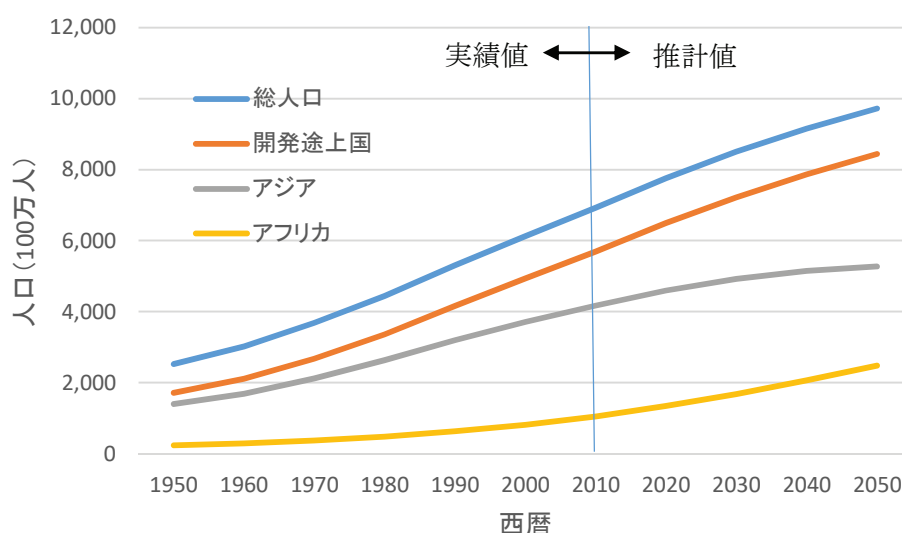
図1.1.1に本研究の背景と課題、取り組みをフローで示す。

1.2 本研究の背景

1.2.1 人口の増加

世界の人口は 2011 年に 70 億人を突破し、2050 年までに 97 億人に達する見込である。図 1.2.1 に世界及び各地域の人口推移を示す。その人口増加率は 2010 年の約 1.4 倍である。総人口うち開発途上国の占める割合は、2010 年で 82%であり、2050 年には 87%にまで達する。一方、地域別に見ると、アジア、アフリカで今後も人口は増加し続け、2050 年にはアジアが全体の約 54%、アフリカで約 25%を占め、両地域合わせると約 80%を占めることになる²⁾。これは以降述べる水の偏在、乾燥地域の拡大、気候の変動から、水不足に直面する地域が拡大することを意味する。

地球上の水資源は有限であり、人間をはじめ生物の生命存続のためには、水は必要不可欠な資源であり、その水資源を確保、維持していかなければならない。



(出典：世界の統計 2017,総務省統計局)

図 1.2.1 世界の人口の推移と予測

1.2.2 水の偏在

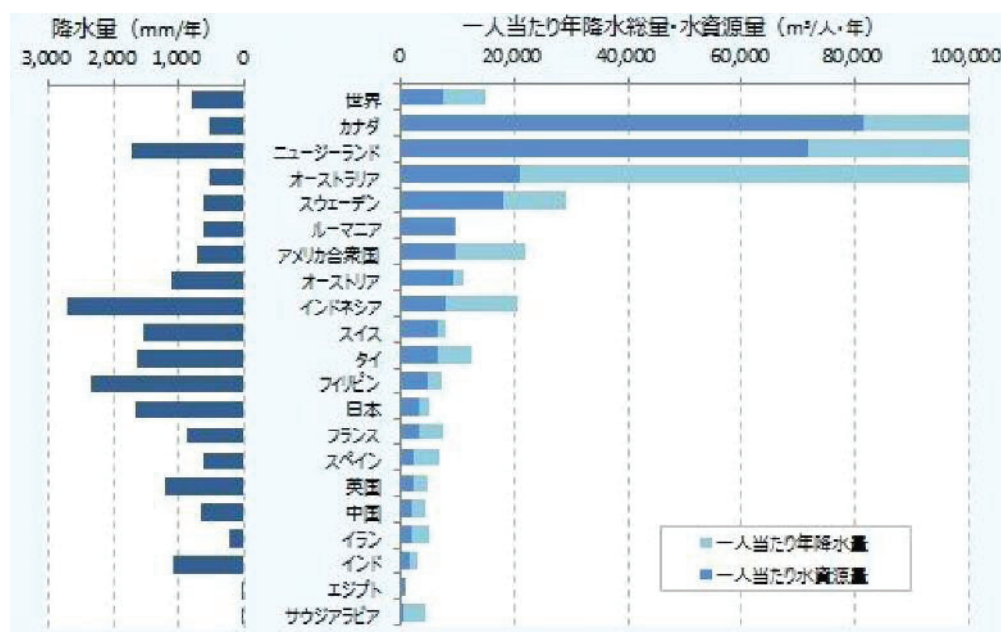
地球上には約 13.86 億 km^3 の水が存在し、うち海水が 97.47% (約 13.51 億 km^3) とほとんどを占めている。淡水は 2.53% (約 0.35 億 km^3) でうち氷河として 1.76% (約 0.24 億 km^3) 存在し、地下水や河川等の割合はわずか 0.77% (約 0.111 億 km^3) しかない。さらに人間がアクセスしやすい水資源である河川湖沼は 0.01% (約 0.001 億 km^3) と非常に限られている⁹⁾。

この水量を現在の人口である 70 億人で分け合うかというところではない。地球上で水は偏在しており、地域によっては水へのアクセスが困難な場所がある。特に乾燥地域では降水量の多くは蒸発してしまうため、地下水の補給や河川流量の増加につながらず、実際に水資源として利用できる水量は僅かな量となってしまう。

一方、豊富な水源と思われている地下水も枯渇するケースが出てきている。地下の帯水層から大量の水をくみ上げた結果、地下水位が年々低下し、また沿岸地域では塩水が浸入し使

用不可能となってきた。地球上の地下量（淡水）は約 1,053 万 km³ であるのに対して，河川・湖沼の淡水量は約 10.5 万 km³ と，地下水は河川・湖沼の約 100 倍の量となるが¹⁰⁾，地下水は地表から長い時間をかけて浸透した水が貯まったものであるため，短期間での大量汲み上げを続けると地下水が枯渇することになる。一方，地下水の主な供給源となる降雨はそれぞれの国や地域の気候に強く依存しており，その量は不均等である。世界の陸域での年平均降水量は 880mm 程度¹¹⁾ であるが，各地域での降雨量の範囲は数千 mm から数十 mm と幅が大きい。また，地球上の水資源は地域に万遍なく分布するのではなく，偏在している。

図 1.2.2 に各国の一人当たり年間の降水量と水資源量を示す⁹⁾。国や地域により利用できる水資源量は大きく異なる。日本の年間降水量は 1,718mm¹¹⁾ でこれは世界平均の降水量約 880mm を大きく上回っている。しかし，一人当たり降水量に換算すると世界平均以下となる。降水量は気候に依存しているが，一方で人口規模により利用できる水資源は大きく異なってくる。



FAO (国際食糧農業機関)「AQUASTAT」の 2015 年 11 月時点の公表データを基に作成
「世界」の値は「AQUASTAT」に「水資源量[Water resource : total renewable(actual)]」が掲載されている 181 ヲ国による

図 1.2.2 一人当たり年降水量と水資源量

1.2.3 乾燥地域

乾燥地域では，一般的に降水量が少なく蒸発散量が大きいため，陸地に水がほとんど存在せず，植物等が息息するための水分も足りないため，砂漠や岩石，樹木の乏しい草原などの景観が広がっている。地球上の乾燥地域は，陸地の約 40% を占め，その地域に人口約 20 億人がいるとされている¹²⁾。この乾燥地を表現する指標に，乾燥度指数と呼ばれる年間降水量を可能蒸発散量で割った値がある。ミレニアム生態系評価(2005)等では，乾燥度指数が 0.65 よりも低い地域を乾燥地と定義している。図 1.2.3 に乾燥地域の分布を示す¹³⁾。極乾燥地を示しているのが，北アフリカ，アラビア半島である。降水量が少ない上にその多くは蒸発するた

め、河川などの表流水とはならず、また地下水源への補充にもならない。一方で、地下水には太古から雨水により地下に閉じ込められた化石水がある。化石水は、いったん消費すると補充には長い年月がかかることから、水量を回復させることは不可能である¹⁴⁾¹⁵⁾。化石水は、不可逆性が極めて高い水源であるため、安易に手を付けるべきではない水資源である。

乾燥地域では降水量が少なく、特に乾燥度指数が 0.05 以下である極乾燥地域は、雨期はなく、人間活動に極めて制限的で、一般にいう砂漠となる。また、乾燥地域では河川や湖沼などの表流水が少なく、降雨直後のみの水流は生じるが、通常は干上がっているワジ(涸れ川)が多数存在する。このような水資源の乏しい地域において、その主な水源は地下水あるいは海水淡水化に依存している。

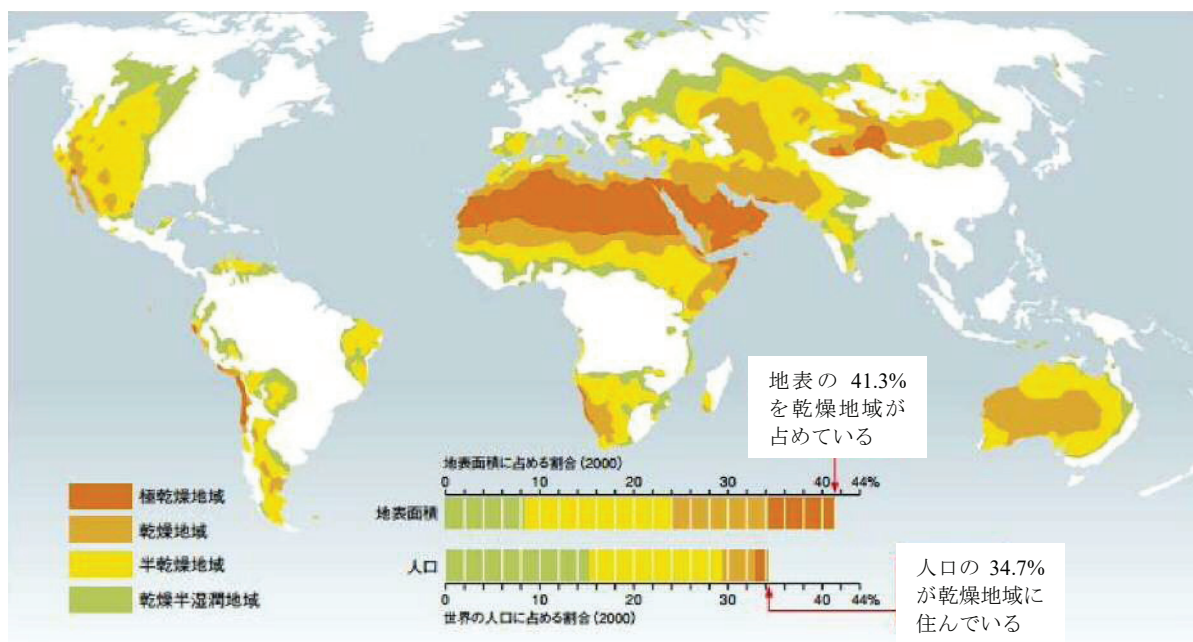


図 1. 2. 3 乾燥地域の分布(Millennium Ecosystem Assessment 2005)

また、一方で人為的な要因で砂漠化が進んでいる。その主な要因は、過放牧、薪炭材の過剰採集、過開墾、不適切な水管理による塩類集積などが挙げられる¹²⁾。図 1.2.4 に乾燥地における人為的による土壌劣化面積とその割合を示す。アジア、アフリカで土壌劣化の面積が大きく、人口の増加や貧困化がより一層、土壌劣化の原因を拡大させている。

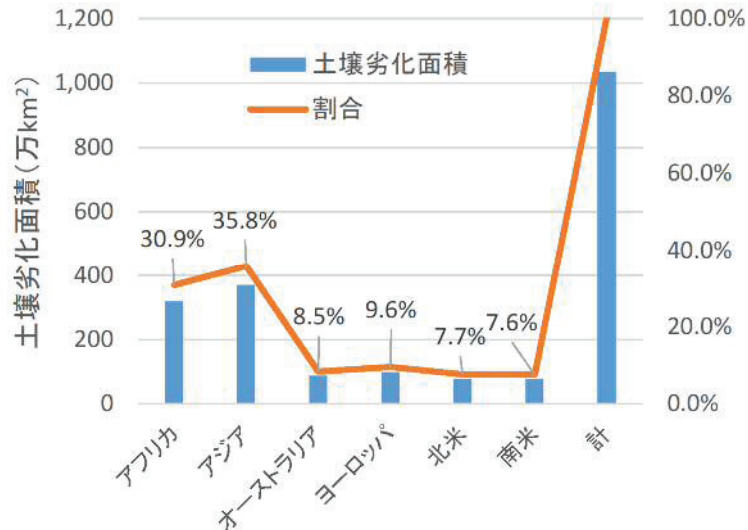


図 1.2.4 乾燥地における人為的による土壌劣化面積とその割合

1.2.4 水需要量の増加

人口の増加とともに懸念されるのが、水消費量の増加である。図 1.2.5 に地域別水使用量の推移を示す¹⁶⁾。地球大陸全体の使用水量は、1995 年から 2025 年には約 1.4 倍に増加すると予測されている。とりわけアジアでの使用水量が大きく、2025 年には全体の約 60%を占めることとなる。一方、アフリカでも全体の占める割合は低いものの、2025 年では 1995 年に対して約 1.5 倍と今後、使用水量が増加していくと予測されている。

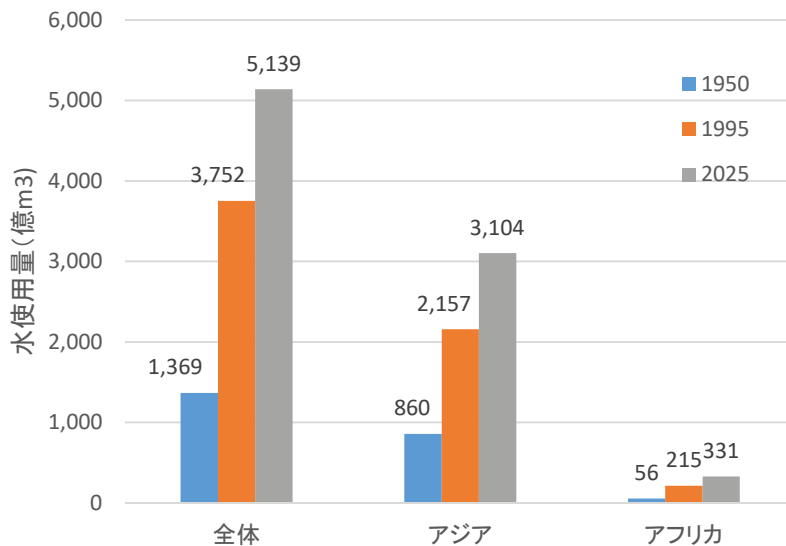


図 1.2.5 地域別水使用量の予測

一方で、水利用の内訳を見ると図 1.2.6 に示すように地域により異なる。世界全体で 70%が農業用水に利用されており、アジア、アフリカでは 83%と大部分を農業用水として利用している¹⁷⁾。今後、水使用の増加が予測される中、人口増加とともに農業用水への需要も高まる

ものと考えられる。そこで、人間の生活用水だけでなく、農業の需要増に応じた水源確保も大きな命題の1つとなる。

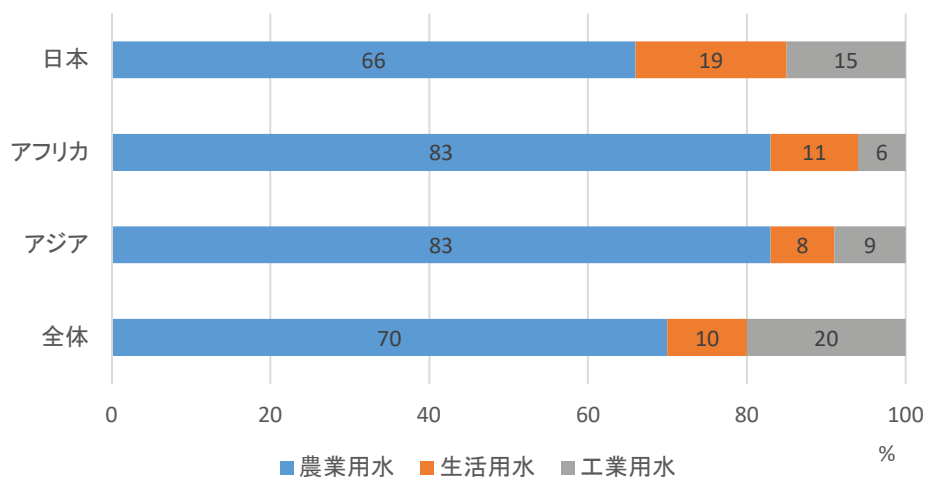


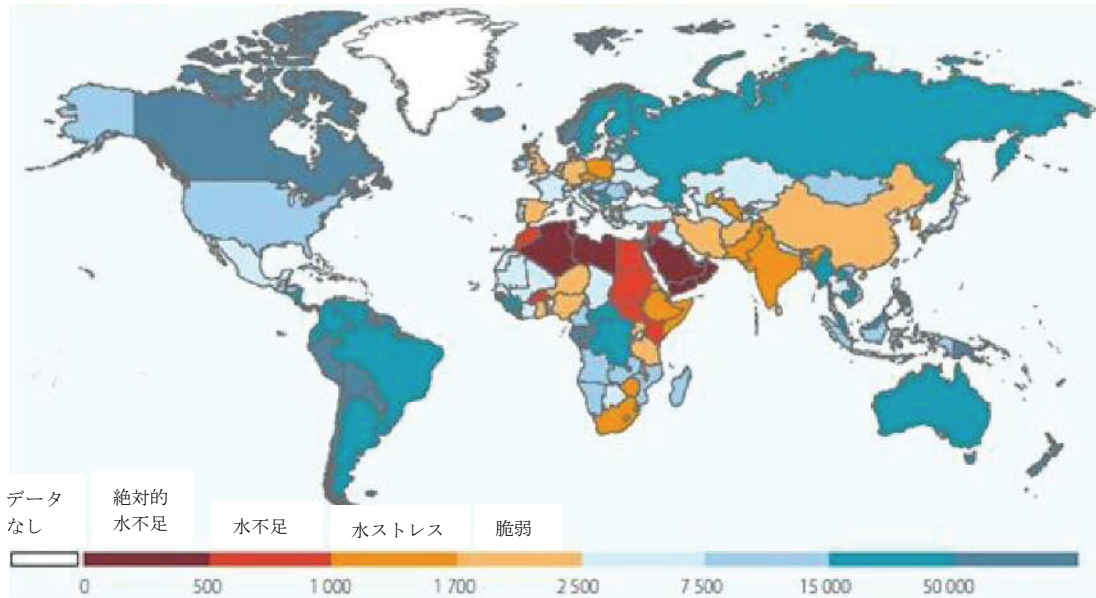
図 1.2.6 世界各地の用途別水利用割合

1.2.5 水ストレス

地域における水不足の度合いを示す指標として水ストレスがある。水ストレスを評価する指標として、人口一人当たりの最大利用可能資源量が用いられる。農業、工業、エネルギー及び環境に要する水資源量は年間一人当たり $1,700\text{m}^3$ とされ、この値を下回る場合は、水ストレス状態にあるといえ、 $1,000\text{m}^3$ を下回ると水不足の状態、 500m^3 を下回れば絶対的な水不足の状態を示す¹⁸⁾。

水ストレスが高い国は、中東、北アフリカなどに多くみられる。これらの地域は水資源そのものが不足しており、年間降水量は 100mm に満たないところもある。図 1.2.7 に示すように中東、北アフリカなどは水ストレスから絶対的な水不足となっている¹⁹⁾。また、地域によって水資源量、水需要量（人口）及び水ストレスは大きく異なる。2050 年の世界予測では、1995 年時点と比較して 3 倍近くとなる約 50 億人が水ストレスにさらされると推定されている²⁰⁾。

気候の変動、水の偏在、水需要量の増加及び水資源の減少により、今後ますます水資源の確保が重要となってくる。そのためには、河川水や地下水以外の新たな水資源の開発が必要となる。



Note: The figures indicate total renewable water resource per capita in m3.
 Source WWAP, with data from the FAO AQUASTAT database
 (出典) The United Nations World Water Development Report 2015, WWDR2015

図 1. 2. 7 世界の水ストレス

1. 2. 6 再生水需要の高まり

工業用水，生活用水の取水量は，GDP が増加するに連れ増える傾向にある．図 1.2.8 に取水量と GDP の関係を示す²⁾．経済成長に伴い所得が増加し，財の消費拡大が水需要を押し上げている．開発途上国においても今後，水使用量が増加することが予想される．また，人口増加も作用し，農業用水の需要も拡大していく．

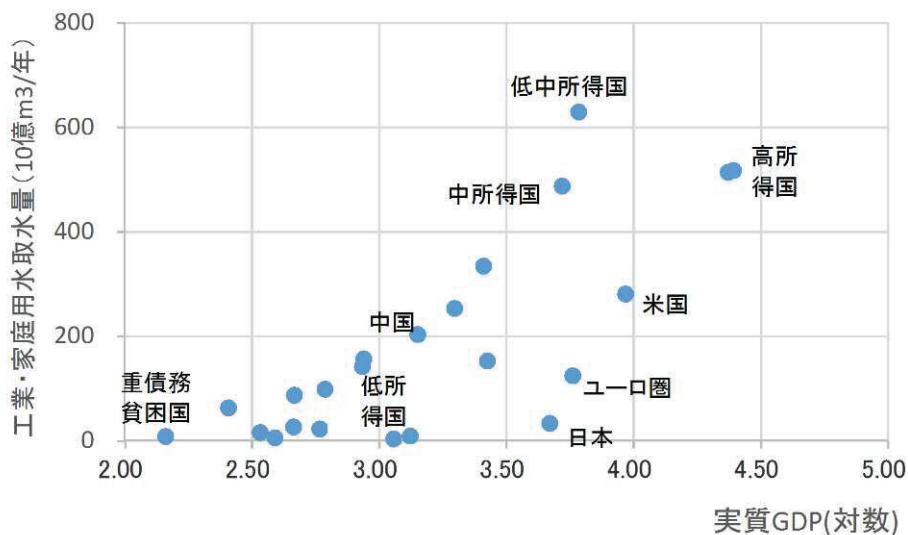


図 1. 2. 8 GDP と水使用量の関係

人口の増加は、食料需要の増加に直結する。穀物の消費量の推移・予測²²⁾を図 1.2.9 に示す。2000-02 年では 1,846 百万トンであったが、2012-14 年では約 1.3 倍の 2,355 百万トンとなった。また、2025 年には 2,805 百万トンに達し、2012-14 年の約 1.2 倍にもなる。その内訳では、食用等が全体(2025 年)の約 59%を占め、今後ますます穀物の消費が増加すると考えられる。

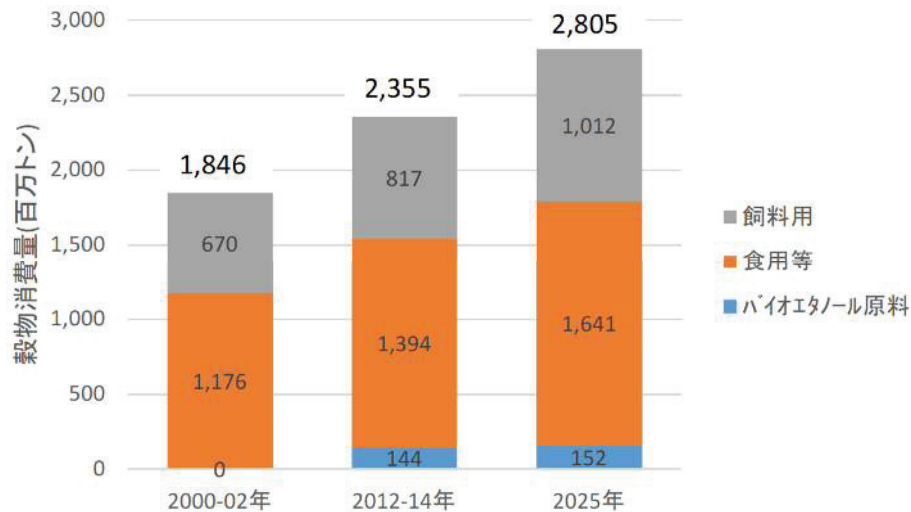


図 1.2.9 世界の用途別穀物消費量の推移・予測

さらに世界の穀物消費量の増加に伴い、水需要も増加する。図 1.2.10 に用途別使用水量の推移・予測²³⁾を示す。1995 年の使用水量 3,752km³に対して、2025 年の予測値では 5,137km³となり、約 1.4 倍になると予想されている。また、うち農業用水が約 61%を占め、今後、農業用水の需要は高まると考えられる。

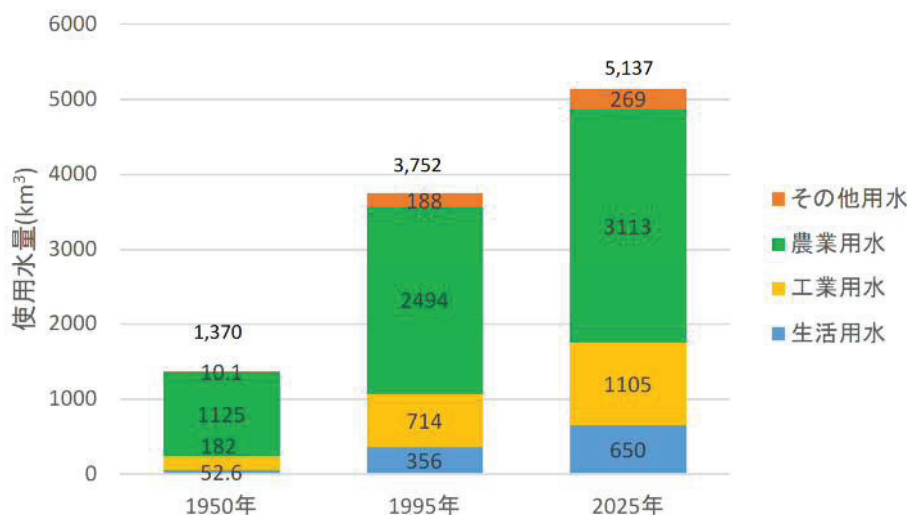


図 1.2.10 用途別使用水量の推移・予測

このような水需要の伸び、とりわけ農業用水の需要量は大きく、開発途上国では農業用水の確保に奔走しなければならない。また、産業で農業を主力としている場合、農業用水の確

保が経済成長の鍵となる。

しかし、農業は水資源なしでは成り立たない。図 1.2.11 に畜産物、農産物の水消費量原単位を示す²⁴⁾。これは日本における 1 トン当たりの生産に必要な水資源量を示すものである。牛豚肉はもちろん、トウモロコシでさえも 800m³/トンと大量の水を消費する。そこで、再生水が水供給の一部担うことが検討される。

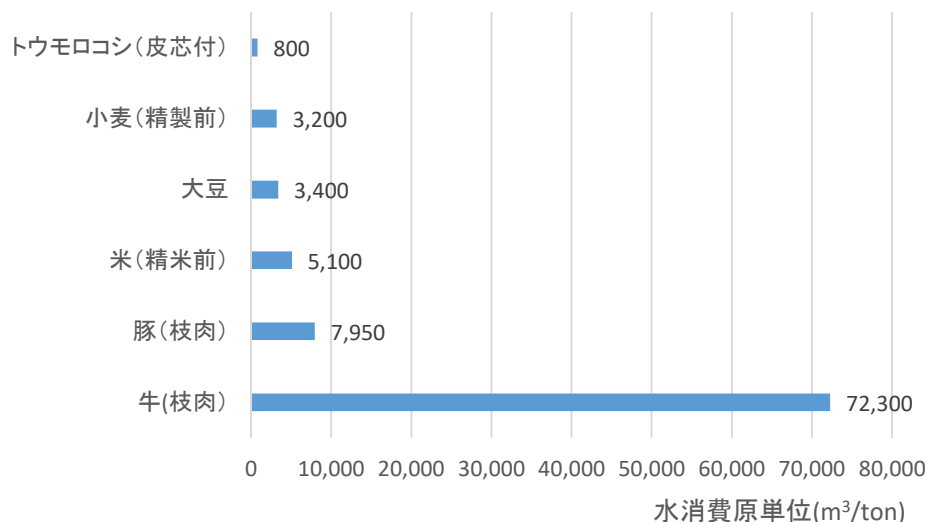


図 1.2.11 生産に必要な水資源量

農業生産の拡大を図るには、耕地面積の拡張が必要である。乾燥地の農地開発はすべて水開発が先行し、利用可能な水量と位置を明らかにしなければならない²⁵⁾。

そこで、再生水を農業用水として導入した場合、水需要の補完のみならず農作物の生産量増加が期待できる。ここで再生水の配分が重要となり、農作物の生産額を最大とするよう品目の選定及び導入を検討した。再生水導入による経済的波及効果を計測については、第 4 章にて詳述する。

1.2.7 持続可能な開発目標と本研究の関わり

世界の動きで、2015 年に国連持続可能な開発サミットで「我々の世界を変革する：持続可能な開発のための 2030 アジェンダ」が採択された。その中に 17 の目標と 169 のターゲットからなる「持続可能な開発目標(SDGs: Sustainable Development Goals)とターゲット」がある²⁶⁾。SDGs は 2016 年から 2030 年までの世界の長期目標として位置づけられている。17 目標のうち、目標 6 では、「すべての人々の水と衛生の利用可能性と持続可能な管理を確保する」としている。目標 6 のターゲット（抜粋）では達成基準を以下のとおりに定めている。

ターゲット 6.2 : 2030 年までに、すべての人々の、適切かつ平等な下水施設・衛生施設へのアクセスを達成し、野外での排泄をなくす。女性及び女兒、ならびに脆弱な立場にある人々のニーズに特に注意を払う。

ターゲット 6.3 : 2030 年までに、汚染の減少、投棄の廃絶と有害な化学物・物質の放出の最小化、未処理の排水の割合半減及び再生利用と安全な再利用の世界的規模

で大幅に増加させることにより、水質を改善する。

ターゲット 6.4 : 2030 年までに、全セクターにおいて水利用の効率を大幅に改善し、淡水の持続可能な採取及び供給を確保し水不足に対処するとともに、水不足に悩む人々の数を大幅に減少させる。

ターゲット 6.a : 2030 年までに、集水、海水淡水化、水の効率的利用、排水処理、リサイクル・再利用技術を含む開発途上国における水と衛生分野での活動と計画を対象とした国際協力と能力構築支援を拡大する。

また、これは SDGs の目標 2 では、「飢餓を終わらせ、食料安全保障及び栄養改善を実現し、持続可能な農業を促進する」としており、目標 2 のターゲット (抜粋) は次のとおりである。

ターゲット 2.3 : 2030 年までに、土地、その他の生産資源や、投入財、知識、金融サービス、市場及び高付加価値化や非農業雇用の機会への確実かつ平等なアクセスを通じて、女性、先住民、家族農家、牧畜民及び漁業者をはじめとする小規模食料生産者の農業生産性及び所得を倍増させる。

ターゲット 2.4 : 2030 年までに、生産性を向上させ、生産性を増やし、生態系を維持し、気候変動や極端な気象現象、干ばつ、洪水及びその他の災害に対する適応能力を向上させ、漸進的に土地と土壌の質を改善させるような、持続可能な食料生産システムを確保し、強靱 (レジリエント) な農業を実践する。

よって、下水道整備及び再生水利用の重要性が改めて認識され、これらの整備・利用が拡大すると期待できる。また、本論文の第 4 章で論じるが、再生水の農業用水利用による波及効果を計測しており、再生水導入による農産物生産量の拡大と経済的な効果が見込める。

このように水質改善、再生水の水道の代替、水不足の改善、再生水導入による農業用水の確保、農業生産量拡大及び経済効果への動きは、世界の潮流に乗っており、本研究の目指す、水不足が顕著な地域での再生水利用システムの構築支援手法の確立と方向性は一致しており、SDG6 及び SDG2 の達成に寄与するものと考ええる。

1.3 本論文の構成

地球上の水資源で利用可能な水は、水全体量に対して極めて少なく、また水資源は大きく偏在している。特に乾燥地域では、一般的に降雨量が少なく、気温が高いことから蒸発散量が大きく陸地には水がほとんど存在せず、水源とその量が極めて限られている。乾燥地域での水源は、地下水に大きく依存しており、枯渇や汚染が懸念される。また、乾燥地域では、人口が増加していることが起因し、水ストレスが高くなっていることから、水資源の安定的な確保は、今後、ますます重要となっていく。

このような背景のもとで、下水処理水の再利用（再生水の利用）が水資源問題の解決策の一つとして期待できる。再生水は安定して供給されるため、貴重な水資源となる可能性が高い。乾燥地域において、持続可能な水利用を実現するために、再生水利用システムの構築が要請される状況が今後、増えてくると考えられる。そこで、まずはこの仮説の有効性について、具体的な検証が必要となる。そこで、1) 下水処理水の処分方法として再生水利用システムが有望な選択肢になりうるのかについて、乾燥地域における実際のフィールドを対象として確認することが有意義である。

一方で、以上が確認されたとしても、地域の特性に応じてシステムの規模や構成が異なりうることから、システムの構築に際しては客観的な検討が必要である。しかし、そのための技術的な蓄積は乏しい。そこで本研究では、2) システム構築の際、下水処理施設の適切な配置を決定する方法がない、そして、3) 構築したシステムの社会的・経済的な効果を計測する方法がないことに着目し、これらを克服するために、乾燥地域における下水処理水の再利用システムの有効性の判断方法、再生水利用を考慮した最適な下水処理施設の配置計画方法、ならびに再生水利用システムの経済効果に関する計測方法を検討する。以上のように、本研究では上記の 1)~3) に焦点を当てて検討する。

まず、一つ目の課題に対しては、ケーススタディとして対象地域を設け、乾燥地域であるオマーン国を取り上げ、下水道施設の新規建設である計画初期段階において下水処理水の利用の可否を含めた再生水導入の可能性について、下水処理水の処分の予備的検討を行う。具体的には、再生水利用システムに代替しうる下水処理水の処分に関するオプションを想定し、それらの経済性の比較を試み、再生水利用システムが有効な選択肢となりうることを立証する。

二つ目の課題の検討に際しては、乾燥地域にある発展途上国では下水道施設が整備されていない場合が多いことに着目した。多くの先進国、新興国のように下水道施設の整備率の高い国や地域では、下水処理水の再利用を考慮せずに、下水の収集及び処理のみを主目的として、下水処理施設の立地が計画されてきた。この場合、下水の収集にかかる費用を抑えるために、低地に建設されることが一般的である。また、下水処理水の再利用計画は、下水処理場位置選定の後、計画されることが多い。しかし、乾燥地域での発展途上国には下水道施設が整備されていない地域が多く、下水処理施設と再生水利用システムを同時に整備すること

があり得る。こうした地域において下水道システムの導入計画を検討するに当たっては、計画当初より処理水の再利用を念頭において処理施設の建設場所を決定することができる。

そこで本研究では、このような計画の場面を想定し、下水の処分を目的とした二次処理施設及び、下水処理水再利用のための高度処理施設の最適な立地を明らかにするため、数理計画モデルを構築する。具体的には、複数の地区から発生する下水を集めて二次処理を行い、そのうち再生水として利用される量を高度処理施設に送り、処理された後に各地区に供給するという設定の下で、費用面で最適となるようどの地区に二次処理施設・高度処理施設を配置するかという問題を、混合整数線形計画法を援用して定式化し、処理施設建設費用と送水費用からなる総費用の最小化を達成しうるような各施設の立地を求めるためのモデルを構築する。また、仮想的なケーススタディを行い、二次・高度処理施設の立地がどのように異なるのかを示すとともに、従来考えられてきたような低地への下水処理場の建設や、ある場所に集約して施設を立地させることが必ずしも適切ではないことを示す。

三つ目の課題に関しては、中央政府が再生水の導入による水資源開発を行って農業振興を計画する場面を想定し、農業生産の増加に伴う経済波及効果を通じて再生水利用システムの効果を計測するための方法論を検討する。

再生水を導入する場合には、どの農産品も再生水を用いて生産できるわけではなく、生産できる農産品は水質の低さを許容しうる品目に限定される。一方、経済波及効果を含めた経済効果の算出には産業連関分析を用いるのが一般的であるが、品目という細かな分類データを直接的に扱うことができないという技術的な課題に直面する。そこでまず、線形計画法を用いて、再生水の導入により増加した水資源量の下で生産額を最大にする農業生産量を品目別に求める。これを農業部門として集約し、実現しうる最大の生産量と考えて産業連関分析に入力することで各産業部門の生産額の変化を求め、その増加分をもって再生水の導入の効果とみなす方法論を開発する。さらに、各品目がどの品質の再生水を受け入れるかという設定の下で、質の異なる再生水（低品質と高品質の再生水）を導入することによる効果の差に着目し、2種類の品質の再生水を導入した場合について、オマーン国を対象として効果を試算し、方法の有効性を確認する。

図 1.3.1 に本論文の構成を示す。

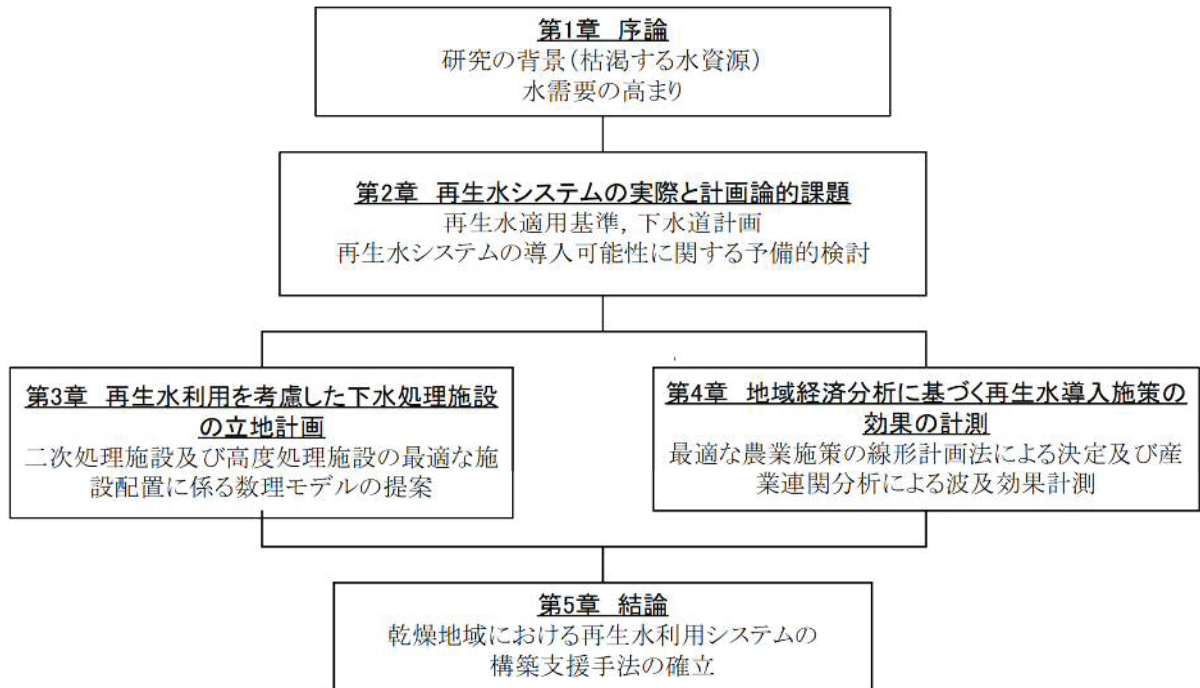


図1.3.1 本論文の構成

参考文献（第1章）

- 1) 内閣官房水循環政策本部事務局（編）：水循環白書（平成28年版），2016.
- 2) 総務省統計局，世界の統計2017, p15～16
- 3) 平井光芳，海水淡水化技術の現状とその将来，日本海水学会誌 第55巻 第3号, pp.130-140, 2001
- 4) (社)日本原子力産業協会 海水の淡水化に関する検討会，海水淡水化の現状と原子力利用の課題 -世界的水不足の解消をめざして-, 平成18年7月, p.28
- 5) California Department of Water Resources: Water Recycling 2030: Recommendations of California's Recycled Water Task Force, 2003.
- 6) 日本経済新聞，2015年2月17日.
- 7) 農林水産省農村振興局整備部地域整備課，農業集落排水施設の処理水のかんがい利用に関する手引き（案），平成29年3月, p.11-12
- 8) Takashi Asano, Franklin L. Burton, Harold L. Leverenz, Ryujiro Tsuchihashi, George Tchobanoglous: Water Reuse, Metcalf & Eddy, p.109, 956
- 9) 国土交通省，水資源，世界の水資源，
http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/mizsei/mizukokudo_mizsei_tk2_000020.html
- 10) 国土交通省水資源部，地球上の水の量，
<http://www.mlit.go.jp/tochimizushigen/mizsei/hakusyo/H17/sankou01.pdf>
- 11) 国土交通省，水管理・国土保全，水害対策を考える，
http://www.mlit.go.jp/river/pamphlet_jirei/bousai/saigai/kiroku/suigai/suigai_3-1-1.html
- 12) 鳥取大学乾燥地研究センター，砂漠化の原因現状，
<https://www.alrc.tottori-u.ac.jp/japanese/desert/genin.html>
- 13) 環境省，国際的な砂漠化対処，砂漠化する地球-その現状と日本の役割，
http://www.env.go.jp/nature/shinrin/sabaku/index_1_2.html
- 14) 大本研一，アステックインターナショナル，2007，枯渇する水源，Macro Review, Vol19, No.2, p10
- 15) フレッド・ピアス，2008，水の未来～世界の川が干上がると，日経PB社, p106-p112
- 16) Sustainable Japan, 環境，世界で広がる水不足～日本の水は本当に安泰なのか，
<https://sustainablejapan.jp/2014/07/10/water-and-japan/11050>
- 17) 国土交通省，水資源に関する世界の現状，日本の現状，資料-4, p9,
<http://www.mlit.go.jp/common/001020285.pdf>
- 18) 国土交通省，第10章水資源に関する国際的な取り組み, p170,
<http://www.mlit.go.jp/common/000160812.pdf>
- 19) 国土交通省，水資源，水資源問題の原因，
http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/mizsei/mizukokudo_mizsei_tk2_000021.html
- 20) Black, M. and King, J. / 沖大幹監訳，沖明訳：水の世界地図 第2版一刻々と変化する水と

世界の問題, p.26, 丸善出版, 2010.

- 21) 経済産業省, 第3章「地球的課題」に対応する「持続的発展のための市場」の創造, 第4節水問題と我が国の取組,
<http://www.meti.go.jp/report/tsuhaku2008/2008honbun/html/i3410000.html>
- 22) 農林水産政策研究所, 平成28年3月, 世界の食糧需給の動向と中長期的な見通し-世界食料需給モデルによる2025年の世界食料需給の見通し-, p23,
http://www.maff.go.jp/j/zyukyu/jki/j_zyukyu_mitosi/pdf/2025_bunseki.pdf
- 23) 国土交通省, 第I編 持続可能な水利用に向けて,
<http://www.mlit.go.jp/common/000120854.pdf>
- 24) 三宅基文, 沖大幹, 虫明功臣, 平成14年9月, 東京大学大学院工学系研究科, 日本を中心とした仮想水の輸出入, 土木学会第57回年次学術講演会, p487-488
- 25) 佐藤一郎, 香川邦雄, 1977, オマーンにおける作物生産の現状と問題点, 熱帯農業, Vol.21, No.1, p45-52
- 26) 国際連合広報センター, 2030 アジェンダ,
http://www.unic.or.jp/activities/economic_social_development/sustainable_development/2030agenda/

表 2.1.2 再生水の分類と潜在的制約因子

下水再利用分類	潜在的制約因子
農業灌漑 作物灌漑 商業種苗	<ul style="list-style-type: none"> 十分な管理が行われない場合の表流水及び地下水の汚染 作物の商品価値と大衆の受け入れ 水質の土壌及び作物への影響，特に塩分
修景灌漑 公園，学校庭，道路分離帯，ゴルフ場，墓地，緑地帯，住宅	<ul style="list-style-type: none"> 病原菌（最近，ウイルス及び寄生虫）に関連した公衆衛生問題 緩衝地帯を含む利用地域制限，利用者コストが高くなる可能性がある
産業用循環利用と再利用 冷却，ボイラー，生産工程，土木工事	<ul style="list-style-type: none"> スケール発生，腐食，生物増殖及び汚れの発生につながる再生水中の成分 公衆衛生問題，特に冷却水中の病原菌のエアロゾル
地下水涵養 地下水補給，塩水浸入制御，地盤沈下対策	<ul style="list-style-type: none"> 再生水中の有機物とその毒性効果，再生水中の溶解性蒸発残留物，硝酸塩及び病原菌
リクリエーション/環境用途 湖と池，沼沢保持，流水補給，釣り，造雪	<ul style="list-style-type: none"> 細菌とウイルスによる健康問題 利用水域の N と P による富栄養化，水棲生物への毒性
水道以外の都市利用 防火，空調，トイレのフラッシング	<ul style="list-style-type: none"> エアロゾルにより運ばれる病原菌の公衆衛生問題 スケール発生，腐食，生物増殖及び汚れの発生への影響 誤接続
飲料水 水道への混合，貯水池，直接供給	<ul style="list-style-type: none"> 再生水中の微量成分，特に微量有機化合物とその毒性効果 美観と大衆の受け入れ 病原菌，特にウイルスの伝搬による公衆衛生問題

2.1.2 再利用水質基準

日本での下水処理水の利用用途は，主に修景用水，河川維持用水，融雪用水及び工業用水である．年間下水処理水量 139.3 億 m³ に対して再生水利用量は約 2.0 億 m³ と利用率は 1.5% に留まっている³⁾．

2005 年に「下水処理水の再利用水質基準等マニュアル（国土交通省）」を策定し，水洗用水，散水用水，修景用水及び親水用水に対して再利用の水質基準を提示している．本マニュアルでは，衛生的安全性確保，美観・快適性確保，施設機能障害防止の観点から，再生水の水質基準，施設基準，再生水利用に当たっての考慮すべき事項を示している．表 2.1.3 に再生水利用に対する水質基準等及び施設基準を示す^{4), 5)}．

表 2.1.3 水質基準等及び施設基準

	水洗用水	散水用水	親水用水	修景用水
大腸菌	不検出 ^{a)}		不検出 ^{a)}	備考参照 ^{b)}
濁度	2度以下			
pH	5.8-8.6			
外観	不快でないこと			
色度	- ^{c)}		10度以下	40度以下
臭気	不快でないこと ^{d)}			
残留塩素	(管理目標値) 遊離残留塩素 0.1mg/L または 結合残留塩素 0.4mg/L ^{e)}			備考参照 ^{f)}
施設基準	砂ろ過施設又は同等以上の機能を有する施設を設けること	凝集沈殿+砂ろ過施設又は同等以上の機能を有する施設を設けること	水洗・散水用水と同じ	

- a) 検水量は100mLとする
- b) 暫定的に現行基準（大腸菌群数 1000CFU/100mL）を採用
- c) 利用者の意向等を踏まえ、必要に応じて基準値を設定
- d) 利用者の意向等を踏まえ、必要に応じて臭気強度を設定
- e) 供給先で追加塩素注入を行う場合には、個別の協定等に基づくこととしても良い
- f) 生態系保全の観点から塩素消毒以外の処理を行う場合があること及び人間が触れることを前提としない利用であるため規定しない

2.1.3 下水水質及び農作物の選定

下水処理水には塩分を含んでおり、通常の二次処理、三次処理では塩分を除去することはできない。塩分を除去するにはイオンまで分離する逆浸透膜（Reverse Osmosis, RO）を用いる必要がある。図 2.1.1 に膜の種類と分離径を示す⁶⁾。しかし、逆浸透膜は高価であり、開発途上国での膜の交換は調達が容易でない。

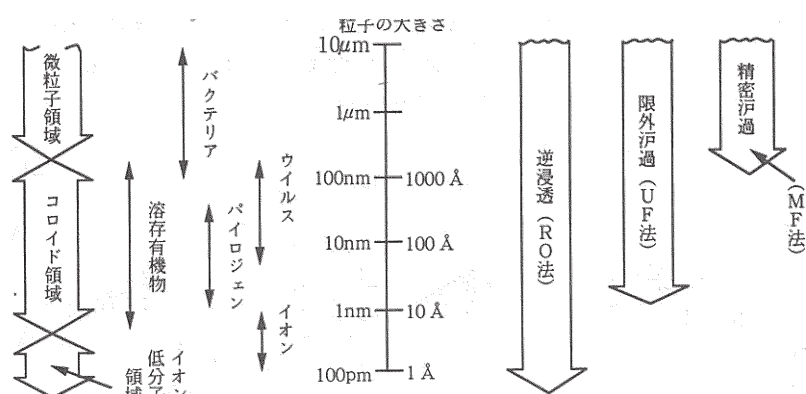


図 2.1.1 膜の種類と分離径

また、流入下水水質と各処理方式によってどの程度除去されるか、塩分に由来する項目及び重金属の濃度及び除去率を表 2.1.4 に示す⁷⁾。ホウ素(Boron)を除けば、高度処理により 90%程度は除去できる。

表 2.1.4 処理方式別の除去率

Item	Raw Conc. mg/L	Primary Effluent		Secondary Effluent		Tertiary Effluent		AWT Effluent ^{b)}		Overall	Recommended Maximum Conc. ^{c, d)} mg/L
		Conc. mg/L	Removal rate %	Conc. mg/L	Removal rate %	Conc. mg/L	Removal rate %	Conc. mg/L	Removal rate %	Removal rate %	
Arsenic	0.0032	0.0031	3	0.0025	19	0.0015	30	0.0003	40	92	0.10
Boron	0.35	0.38	0	0.42	0	0.31	13	0.29	3	17	-
Cadmium	0.0006	0.0005	17	0.0012	0	0.0001	67	0.0001	0	83	0.01
Chloride	240	232	3	238	0	284	0	15	90	94	-
Chromium	0.003	0.004	0	0.002	32	0.001	24	0.001	28	83	0.10
Iron	0.6	0.53	11	0.18	59	0.05	22	0.04	2	94	5.00
Lead	0.008	0.008	0	0.008	0	0.001	93	0.001	0	91	5.00
Manganese	0.065	0.062	4	0.039	37	0.002	57	0.002	0	97	0.20
Nickel	0.007	0.01	0	0.004	33	0.004	11	0.001	45	89	0.20
Selenium	0.003	0.003	0	0.002	16	0.002	0	0.001	64	80	0.02
Sodium	198	192	3	198	0	211	0	11.9	91	94	-
Sulfate	312	283	9	309	0	368	0	0.1	91	99+	-
Zinc	0.081	0.076	6	0.024	64	0.002	27	0.002	0	97	2.00

a) Western Consortium for Public Health (1992). Primary treatment consisted of a rotary drum screen followed by disk screens, secondary treatment was with water hyacinths, tertiary treatment consisted of lime precipitation and depth filtration, and AWT comprised reverse osmosis, air stripping, and carbon adsorption.

b) AWT=Advanced wastewater treatment

c) Ayers and Wesstcot (1985) and NRC (1973)

d) The maximum concentration is based on a water application rate of 1.25m/yr

表 2.1.4 の水質項目のうち、水素イオン(Chloride)、硫酸塩(Sulfate)、 ナトリウム(Sodium)、 ホウ素(Boron)に共通する発生源の一つが海水の浸入であり、塩分に由来する⁸⁾。再生水を灌漑用水に用いた場合、その適正な値は USEPA の再利用ガイドラインによると表 2.1.5 のとおりである⁹⁾。

表 2.1.5 再生水の水質項目と適正範囲

Parameter	Unit	Degree of Restriction on Use		
		None	Slight to Moderate	Severe
E_{cw}	dSm^{-1}	<0.7	0.7 - 3.0	>3.0
TDS	mg/L	<450	450 - 2,000	>2,000
Sodium	meq/L	<3	>3	
Chloride	mg/L	<70	70 - 355	>355
Boron	mg/L	<1.0	1.0 - 2.0	>2.0
ph			6.5 - 8.4	

一方、栄養塩類や大腸菌群数などを処理方式別の処理水質を表 2.1.6 に示す⁷⁾。ここで重要なことは原虫類のう胞(Protozoan cysts and oocysts)の除去である。

膜処理は、大腸菌をほとんど除去でき、その他の細菌やウイルスについても低減することができる。浄水処理の例ではあるが、砂ろ過と膜処理によるクリプトスポリジウムのオーシストの除去性能は、急速砂ろ過法で 2.5log、精密ろ過膜法 (MF 法) で>6log、限外ろ過膜法 (UF 法) で>7log であり、膜処理は砂ろ過方と比べて高い除去性能を有している¹⁰⁾。

表 2.1.6 一般的な処理方式別処理水質

Item	unit	Range of effluent quality after indicated treatment						
		Untreated wastewater	Conventional activated sludge ^{a)}	Conventional activated sludge with filtration ^{a)}	Activated sludge with BNR ^{b)}	Activated sludge with BNR and filtration ^{b)}	Membrane bioreactor	Activated sludge with microfiltration and reverse osmosis
TSS	mg/L	120-400	5-25	2-8	5-20	1-4	≤2	≤1
BOD	mg/L	110-350	5-25	<5-20	5-15	1-5	<1-5	≤1
COD	mg/L	250-800	40-80	30-70	20-40	20-30	<10-30	≤2-10
T-N	mg/L	20-70	15-35	15-35	3-8	2-5	<10 ^{c)}	≤1
T-P	mg/L	4-12	4-10	4-8	1-2	≤2	<0.3 ^{d)} -5	≤0.5
TDS	mg/L	270-860	500-700	500-700	500-700	500-700	500-700	≤5-40
Total coliform	No./100mg/L	10 ⁶ -10 ⁹	10 ⁴ -10 ⁵	10 ³ -10 ⁵	10 ⁴ -10 ⁵	10 ⁴ -10 ⁵	<100	~0
Protozoan cysts and oocysts	No./100mg/L	10-10 ⁴	10-100	0-10	0-10	0-1	0-1	~0
Viruses	PFU/100mL ^{e)}	10-10 ⁴	10-10 ³	10-10 ³	10-10 ³	10-10 ³	1-10 ³	~0

a) Conventional secondary is defined as activated sludge treatment with nitrification.

b) BNR is defined as biological nutrient removal for the removal of nitrogen and phosphorus.

c) With anoxic stage

d) With coagulant addition

e) Plaque forming units

また、再生水を農業用水として利用する際、作物の選定が重要となる。作物の選定には、1) 当該地域の農産物、2) 塩分に対して耐性が高い、を考慮する必要がある。

乾燥地域の一つであるアラビア半島に目を向けると、UAE、サウジアラビア、オマーンでの主な農産物は、デーツ、モロコシ(Sorghum)、トマト、キュウリ、小麦、ジャガイモ、タマネギ、バナナ、スイカなどである^{11), 12), 13)}。

一方、塩分に対して耐性がある場合、生育障害、枯死の可能性が低くなり、持続的に再生水を用いることができる。表 2.1.7 に作物の塩分に対する耐性を示す¹⁴⁾。デーツ、アルファルファ、モロコシ、小麦などは比較的塩分に耐性があると言える。なお、抽出した作物は乾燥地域での特産物を対象とした。

表 2.1.7 農作物の塩分耐性^{a), b)}

Crops	Sensitivity ^{c)}			
	Tolerant	Moderately tolerant	Moderately sensitive	Sensitive
Sorghum		✓		
Wheat		✓		
Cucumber			✓	
Onion				✓
Potato			✓	
Tomato			✓	
Alfalfa	✓			
Date palm	✓			
Orange				✓

a) Westcot and Ayers(1985)

b) These data serve only as a guideline to the relative tolerances among crops. Absolute tolerances vary with climate, soil conditions, and cultural practices.

2.2 下水道計画の策定手順

2.2.1 一般的な下水道計画

下水道事業全体の策定手順は、事業着手の意思決定から、全体計画の策定、事業計画の策定及びそれに伴う手続、実施設計、施設建設、運転維持管理となっている。下水道の主な役割は、トイレの水洗化といった生活環境の改善、公共用水域の水質保全、雨水の排除及び下水処理水・汚泥の再利用などの資源の有効利用である。最も優先される目的は、生活、事業活動から発生する下水を速やかに排除することである。そのためにも発生した下水を集水し、下水処理場で処理し、放流することが第一義的な目的となる。

下水道施設は、一度稼働すると下水を処理し続けることとなり、機能の停止は困難となる。加えて施設の運転維持管理が重要となり、施設機能の維持、長寿命化のため適切な運転維持管理が求められる。下水道施設は主に下水管渠、中継ポンプ場及び下水処理場で構成され、効率の良い下水収集のためこれら施設の配置を計画する。そして一度、施設を建設した後は、施設の耐用年数（土木・建築：50年程度、機械電気設備：15年程度）を迎え、更新時期まで配置、すなわち場所を変えることは極めて困難である。また、下水道事業の効果が得られるまでには、下水管渠の整備など面的な拡大に膨大な費用と時間がかかる。よって、下水道計画は建設費用と運転維持管理費用に大きく影響してくる。

一般的な下水道計画では、施設の規模と配置を決定することであるが、そのためにはまず、目標年次、下水排除方式（分流式、合流式下水道）、下水処理方式及び計画下水処理区域を決める必要がある。施設の規模を決定するため、現況の人口、産業、水需給計画及び土地利用計画などから計画人口、計画下水量を算定する。

計画下水量により施設規模が決定し、下水処理場、下水管渠、必要に応じてポンプ場のそれぞれの施設配置を計画する。

一般的な下水道計画の手順を図 2.2.1 に示す¹⁵⁾。

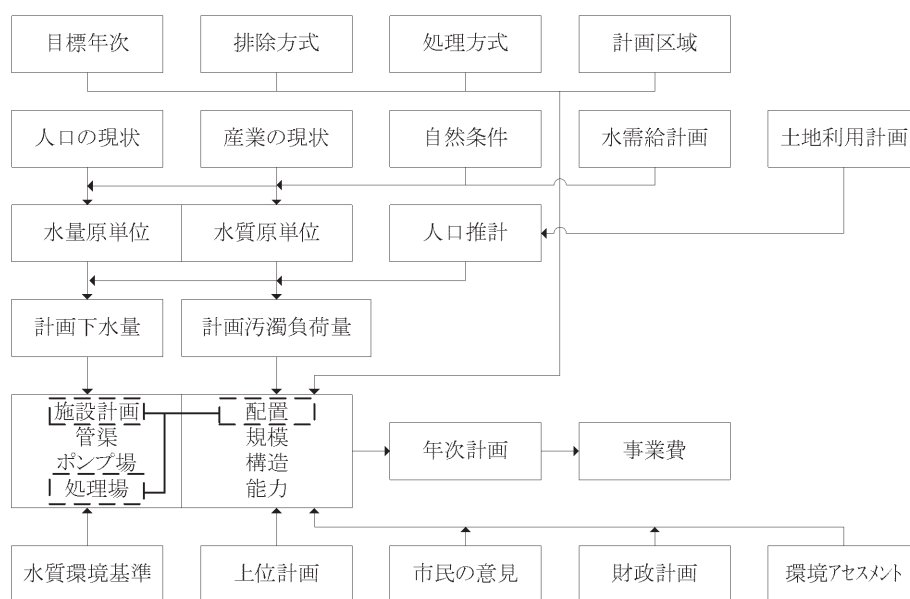


図 2.2.1 下水道計画策定手順

一般的に発生した下水を収集する際、省エネルギーにより自然流下方式を用いることから、必然的に下水処理場（二次処理施設）の位置は低地が選定される。

このとき、下水処理場の立地として望ましい条件¹⁵⁾を次に示す。

- (ア) 地形上、下水を用意に収集できる地点であること
- (イ) 処理区域に近いこと
- (ウ) 海や河川といった適当な放流先があること
- (エ) 十分な面積が確保できること
- (オ) 放流先の水利用との調整が図れること
- (カ) 付近の住人の同意が得られること
- (キ) 地質が良好で浸水の恐れがないこと
- (ク) 汚泥の処分が容易な地域であること

これら全ての条件を満たす場所を探すことは困難だが、可能な限り条件に合う場所を選定すべきである。下水道の第一の目的である下水の排除を達成すべく、できる限り自然流下方式で下水を収集し、処理後、公共用水域に放流する。よって下水処理場は、放流先のある海域、河川下流域の近くといった低地に建設することが経済的で最適といえる。

2.2.2 再生水利用を考慮した下水道計画

ここまでは下水の排除を目的とした下水処理場の望ましい位置選定を論じてきたが、下水道計画の当初から、下水処理水の再利用も見込んだ場合、果たして低地に建設するのが最適なのか検討する必要がある。

図 2.2.2 に再生水利用を考慮した場合の下水道計画策定手順を示す。ハッチングした項目は下水処理水の再利用を考慮した際の手順フローである。（注：ハッチング箇所は参考文献 15 を改編）

下水処理水の再利用を計画する場合、まず下水道計画立案と同様に作業手順が存在する。まず、計画処理区域での水需要のニーズアセスメントを行う必要がある。対象地域は水ストレスの高い乾燥地域であること想定しており、水需要は高いといえる。そしてその再生水の利用用途は、現状の水使用量を考慮するとともに土地利用計画にも関連するため、土地計画と整合をとる必要がある。例えば、土地利用で田畑の占める割合が多い場合は、農業用水の需要が高いと予想され、また、植樹帯が多ければ散水用水の需要が高いと考えられる。次に再生水の利用用途が決まれば、要求される水質基準に合わせる必要がある。農業用水・散水用水、修景用水などの用途ごとに水質基準が設定され、その基準を満たすために必要に応じて高度処理の導入を検討する。高度処理方式が決まれば、立地場所が選定された二次処理施設の後段に付加的に三次処理施設（高度処理）が設置される。

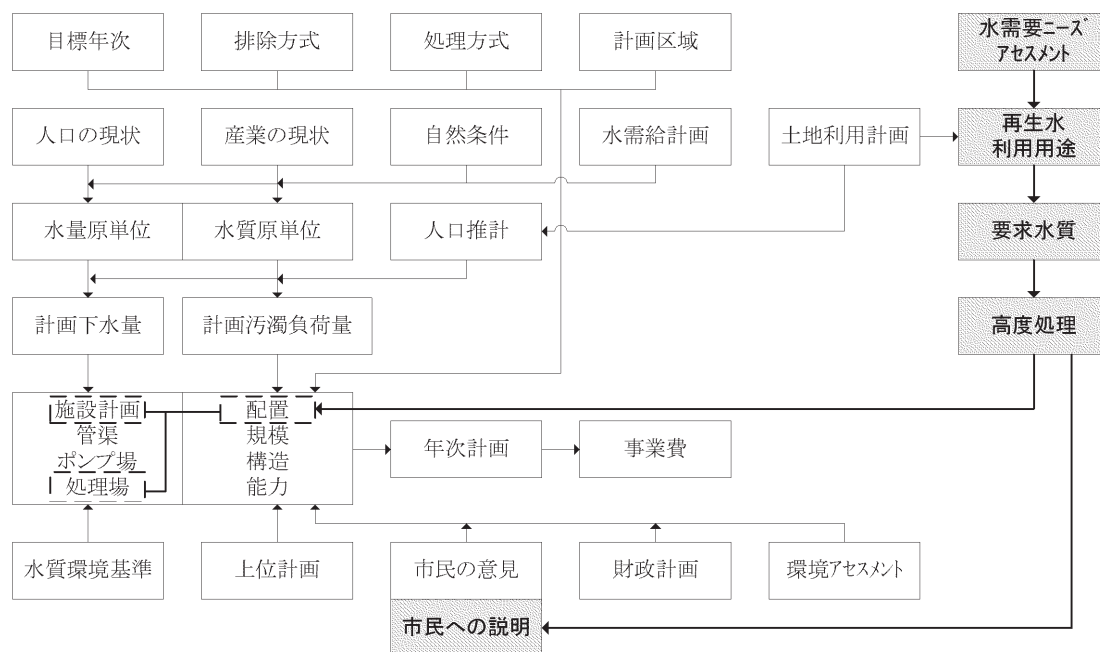


図 2. 2. 2 下水処理水の再利用を考慮した下水道計画策定手順

前述した望ましい立地条件をできる限り満たし，低地に下水処理場が設置される．さらに下水処理水の再利用のため，自然流下で収集した下水を，再生水として水需要地に送水するための動力（ポンプ送水）を必要とする場合がある．

しかし，当初から再生水利用を計画に含んだ場合は，二次処理施設の位置が必ずしもクリティカルにはならず，高度処理施設の位置と関連して，水需要地の位置とその需要量に応じて，変動する可能性がある．

下水道計画の当初から，下水処理水の再利用も見込んだ下水処理施設の最適配置計画のための数理最適化モデルを構築する．本論文第 3 章で詳述する．

一方，下水道事業の採択もしくは再評価には，主に費用効果分析が用いられる^{16),17)}．その効果計測項目は，生活環境の改善，公共用水域の水質改善，浸水の防除及び処理水の有効利用を含んだその他からなる．しかし，この分析は再生水の導入効果そのものを計測するものではない．さらに利用用途ごとへの評価計測は示されておらず，農業用水に用いた場合では農産物の品目ごとへの生産量算定はできない．

2. 2. 3 乾燥地域での下水道整備状況

前述した施設配置計画の自由度は，計画立案時の下水道施設の整備状況に大きく左右される．日本の下水道普及率は 78.8%（2018 年 3 月 31 日現在）¹⁸⁾である．このように下水道普及率が高い場合は，下水処理場の位置を変更することは不可能である．

一方，地域別にみると，南アジア，中央アジア，アフリカ地域での下水道普及率は低い水準となっている¹⁹⁾．図 2.2.3 に各地域での下水道普及率を示す．生活排水処理率は，水ストレスが高く，かつ水需要が大きい中東では 60%未満であり，アフリカではほぼゼロとなってい

る。

よって、水ストレスが高く、水需要が高い地域かつ下水道施設が整備されていない地域では、再生水の利用を計画当初から含めた下水処理場の立地を計画する素地は十分にあると言える。

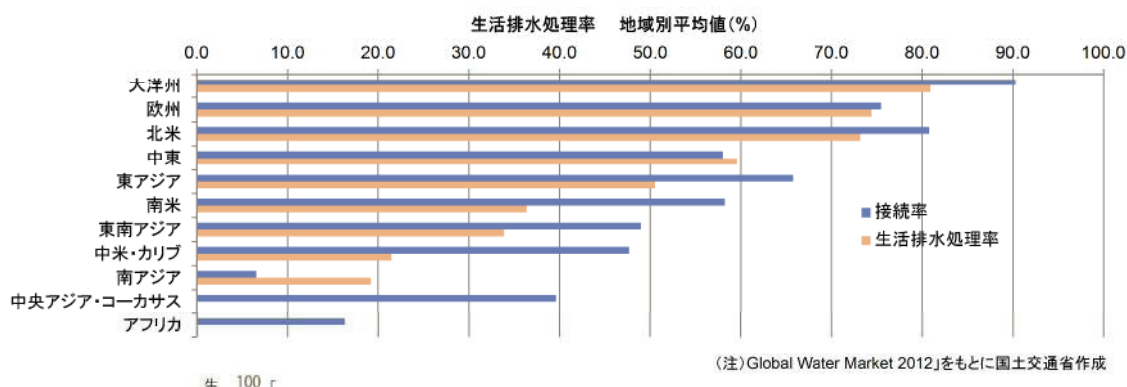


図 2.2.3 各地域での下水道普及率

再生水の利用を計画当初から見込んで下水道システムの立地を計画する場合、二次処理施設の後段に高度処理施設の付加にとどまらない計画となることが必然であるため、計画の規模は比較的大きくなると考えられる。このため、計画の経済的な効果に関する説明責任がより厳しく求められると考えられる。特に、再生水は、その水質の低さから、どの用途にも自由に用いることが必ずしもできないという制約があることから、その点を踏まえてシステムを導入する場合の効果を計測し、計画の妥当性を立証する必要性が生じる。

2.3 本研究で着目する計画論的課題

上述のように、乾燥地域の多くでは水資源が十分に確保されておらず、下水道システムの整備も十分に進んでいない。そのような状況の下、下水処理水の再利用すなわち再生水は、安定した水源となり得る。そこで計画当初から、再生水利用を前提として下水道システムを目指すことが有効であると考えられる。しかし、このような計画場面を想定した再生水システムの構築方法が開発されていない。具体的には、1) 再生水の利用を計画当初から含めた再生水システムの立地を計画するための方法がない、2) 再生水の品質を考慮した再生水システムの社会的・経済的な効果を計測する方法がないことがあげられる。本研究は、これらの二つの課題に焦点を当てて、方法論的な知見を得ることを目的とする。

一方、これらの問題意識はあくまで再生水の再利用を含んだ下水道システムが有効であることを前提としたものであるが、その前提そのものが妥当であるのかについての根拠が疑わしい。そこで、上記の 1), 2) の課題の議論に先立って、次節においては具体的なフィールドを対象として、いくつかの代替的な処理方法との比較を通じて再生水システムの導入可能性を予備的に検討する。これにより、上記の課題の前提も備わっていることを実証的に確認する。

2.4 再生水システムの導入可能性に関する予備的検討

2.4.1 既往の研究

乾燥地域では、一般に降水量がほとんどなく、蒸発散量が高いことから水源は地下水と海水淡水化に依存している^{20),21),22)}中東に位置するオマーンを選定した。ここでは、農業用水はほとんど地下水と水路システムに頼っており²³⁾、飲料水の99%は地下水を使用している²⁴⁾。

また、オマーンでは、地下水の過剰汲み上げが問題となっている。結果として、沿岸付近の地域では、海水の浸入を許している²⁵⁾。そこで Salalah 地区では海水浸入防ぐため、下水処理水を用いて井戸から補充している^{26),27)}。また、下水処理水の再利用として散水用水としても利用されている。下水処理水の地下水補充は、水量確保のために利用されているが、都市部に近い地下水水質は、無機物、COD、BOD 及び細菌類による汚染で年々悪化している。

オマーンで採用されている下水処理方式は、主に二次処理であり、下水処理水中の E.coli 平均濃度は 14,023 MPN/100mL である²⁷⁾。アメリカ合衆国では、地下水補充を目的とした場合、要求される水質は州によって異なり、それぞれの下処理計画において定められる²⁸⁾。

よって、現状の下水処理方式及び処理水質での地下水補充（再生水利用）は、地下水汚染の原因となり、ひいては健康問題を引き起こす可能性がある。処理水による地下水補充は健康問題の大きな関心となっている²⁸⁾。よって下水処理水は、その処分もしくは地下水補充を除く再利用がオプションとなる。

最初のオプションは、下水処理水の排水が挙げられる。しかし、一見安価と考えられやすい排水にも、放流先までの配管（放流管）の整備、放流先までの距離、揚程によってはポンプ場の設置及びその運転維持管理が加わる。

下水処理水の発生を都市全体で見たとき、下水処理水は処分の対象だけではなく、資源と見なして再利用の観点から評価することができる。オマーンでは20年以上前から下水処理水を散水用水に再利用してきた^{25),29),30)}。そこで本研究でも下水再利用の利用用途は、散水、修景用水を主とする。

また、乾燥地域では、下水処理水や Gray water の処理水が散水用水として再利用されている一方、下水処理水の放流が環境に影響を与え、海域への水質汚染を引き起こしているとの報告がある^{31),32),33)}。そこで、下水処理水の処分もしくは再利用について、環境保全、地下水資源の保全の観点から最適な利用方法を総合的に検討する必要がある。本研究では、断続的に発生する下水処理水の処分・再利用について、それに係る費用（施設建設及び運転維持管理）を考慮し、最適なオプションを検討するものである。

対象地域は乾燥気候を有していることから、水資源の有効利用は水利用の持続可能にとって大変重要となる。オマーンにおいても少ない降雨量と高い蒸発散量のため陸地に水が存在せず、水不足に直面している。海岸地域では、年間の降水量が 60-100mm 程度であり³⁴⁾、一方、蒸発散量は、ほとんどの乾燥地域で極端に高く、標高や面積により異なることから 1,825-5,475mm/年と幅広い値となっている^{35),36),37)}。オマーンでの年間降雨量は 71mm、蒸発散量は 2,387mm である³⁸⁾。毎月の降水量と蒸発散量を図 2.4.1 に示す。そのため、主な水源は地下水及び海水淡水化に依存していることから、下水処理水の再利用は新たな水源として利用

することができる。

対象地域は内陸部に位置し、新興都市として開発が進められており、今後人口が増加していくことが見込まれる。本地域では、人口の増加に伴って発生下水量も増加することが予想され、そのため都市開発と共に下水道整備計画が進められている。今後、発生する汚水は処理後に新たな水源としての役割を期待できる。

しかし、本地域では、ほぼ全域が地下水の保全区域に指定されているため、下水処理水の放流が禁止されている。下水処理水の再利用は地下水の水質保全だけでなく、都市化する区域において、特に散水用水、修景用水にとって新水源としての役割を持つことになる。このため本研究では下水処理水の処分・再利用方法を提案し、これらの方策に対し建設費、運転維持管理費を算出することで費用面から最適な処分/再利用システムを選定する。これにより乾燥地域に適した水循環システム構築の方法を提案する。

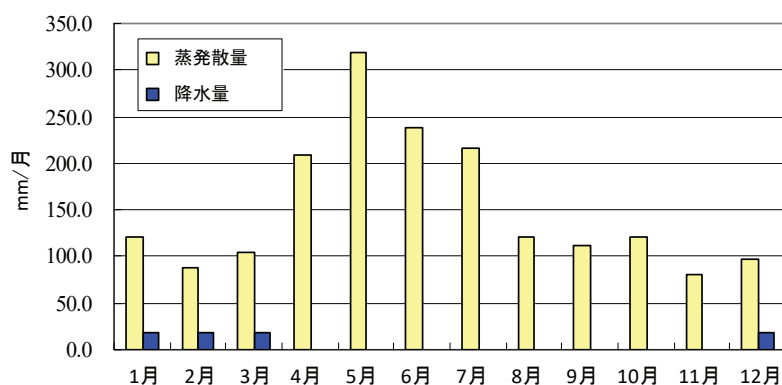


図2.4.1 オマーン国の降水量と蒸発散量

2.4.2 対象地域の水環境

対象地域は内陸部に位置し、新興都市として開発が進められており、今後人口が増加していくことが見込まれる。本地域では、人口の増加に伴って発生下水量も増加することが予測される。そのため都市開発と共に下水道整備計画が進められている。さらに再生水を植生の散水に利用した場合、このような制約の下、下水処理水の行き先を確保し、放流以外の利用・処分方法を見いだす必要がある。対象地域の取水から都市部への配水さらに発生した下水の二次処理及び排水（再利用なし）までのフローを図2.4.2に示す。地下水保全地域への二次処理水の排水は、依然、有機物、大腸菌群数が多いことから地下水汚染を引き起こす可能性がある。同時に一度汚染された地下水質の回復は容易でなく、不可逆性が高い。

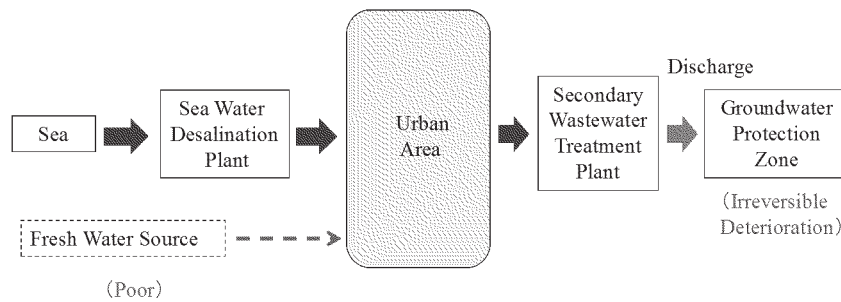


図2.4.2 取水から下水処理までの水の動き

2.4.3 持続的な再生水システムの検討

(1) 対象地域の下水道計画

対象地域の人口は、都市開発により 36,000 人(2003 年)から 250,000 人(計画目標年:2045 年)に達すると予測される。発生汚水量は、2015 年で 9,770m³/日、2045 年では 46,500m³/日になると予測される³⁹⁾。

人口増加に伴う下水量の発生に対して、新たに 2 つの下水処理場 (Sewage Treatment Plant: STP) の建設が計画している。計画下水処理能力は STP-1 で 36,000m³/日、STP-2 で 16,000m³/日である。下水処理場の計画位置及び地下水保全区域を図 2.4.3 に示す。

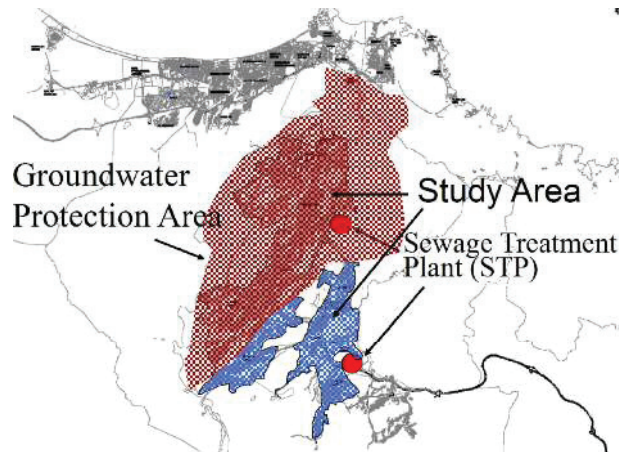


図2.4.3 下水処理区域及び地下水保全区域

(2) 下水処理水の利用・処分システムの検討

対象地域では、既に散水や修景に上水を使用している。下水の高度処理を行った場合、下水処理場からの処理水 (Treated Effluent: TE) も散水用水や修景用水に再利用でき、上水の代替となり得る。都市開発に伴い公園、緑地帯の拡張により再生水の潜在需要量は高い。また、地下水保全区域においても高度処理を導入することで処理水質を高め、地下水への影響を小さくすることで散水用水等に使用できることとした。

再生水を用いて散水する場合、最も留意すべき点は供給の持続性である。特に夏期では水供給不足が植物の枯死を招くことから、その供給量を十分確保することは重要である。一方、冬期では、試算では散水の水需要は、夏季の約44%になる。よって年間を通して一定量生産、供給される再生水は、冬期での水需要が少なく供給過多となり余剰水（Excess TE）が発生する。系内では下水処理水の放流は禁止されているため、この余剰水の最適な処分方法を検討する必要がある。図2.4.4に対象区域での発生汚水量と余剰水の推移を示す。

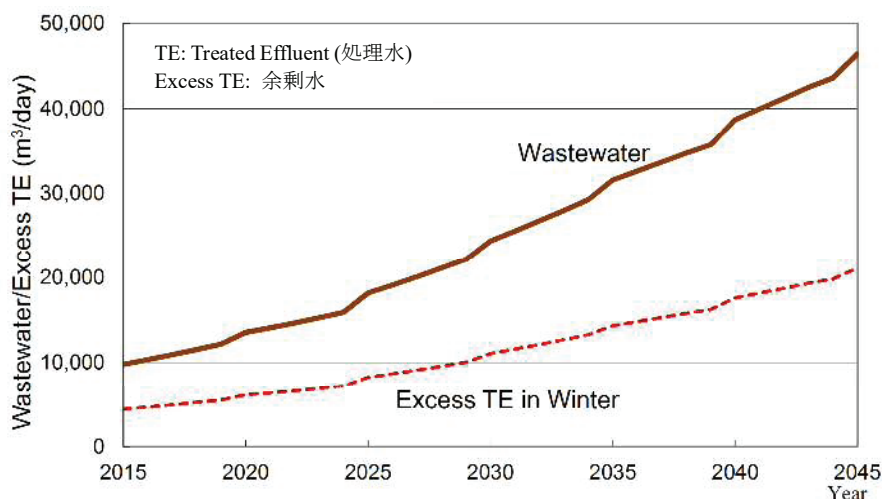


図2.4.4 対象区域での発生汚水量と余剰水量の推移

対象地域において下水処理水の利用及び処分するシステムを検討するとき、次の3つを前提とする。

- a) 浄水コストよりも下水処理水の再生水コストが廉価の場合、上水の代替水源となる。
- b) 再生水利用は、人口増加に応じた下水処理水量の増加に対応する。
- c) 対象区域が地下水保全区域（系内）のため下水処理水の放流を禁止する。

再生水は用途に応じて高度処理の水質レベルを要するため、一般的にコストが高いが、対象地域のように水源を主に海水淡水化に依存している地域では上水の生産コストに比べて、再生水のコストが低くなる可能性がある。また、下水処理水は比較的安定して供給されるため、貴重な水資源として再生水の安定した供給が可能である。

海水淡水化による水価格は、電気や石油の価格に影響され安定的ではない。そこで上水価格が、下水処理水の最適な処分・再利用システムを選定する際の主要因となる。よって本研究では、上水価格の変動を考慮した感度分析を、以降設定した各ケースについても行った。

しかし、再利用するためには、利用基準値に適合するために高度処理施設や再生水配水のため配水施設などを追加整備する必要があり、追加のコストが発生する。そこで前述の前提a)~c)を満たし、かつコストを抑えた再生水利用・処分システムを構築するため、次の4つの

ケースを設定し、コスト比較により最適なシステムを選定する。

Case 1：全量再利用（系内）

Case 2：全量を海へ放流（系外で全量処分）

Case 3：地下水保全区域内（系内）で蒸発散量を利用した全量蒸発（系内で全量処分＋一部修景効果）

Case 4：地下水保全区域外へ全量送水し、系外にて再利用（系外で全量再利用）

(a) Case 1：全量再利用

1) 再生水の利用用途

まず、挙げられるのが下水処理水を全量再利用するケースである。下水処理水の再利用では、対象地域に適用できる用途を検討した。

対象地域に適用できる主な利用用途は、散水用水、修景用水及び農業用水が考えられる。そこで潜在的需要を考慮し、再生水の利用用途を定性的に評価した。その検討を表 2.4.1 に示す。

その結果、再生水の利用用途は緑地散水、農業用水及び人工湖貯留による修景用水とする。

2) 余剰水の処分方法

年間を通して安定的に発生、供給される下水処理水は、季節変動により植生の水需要は変化する（夏期の水需要に対して、冬期は約 44%、春秋期は約 81%、まで低下する）。図 2.4.5 に時期ごとの下水処理水の供給可能と余剰水発生 の概念を示す。最も需要の大きい夏期に対して、それ以外の時期は余剰水が発生する。仮に余剰水が発生しないよう冬期の需要に処理水供給範囲を広げた場合、それ以外の時期には水不足が生じ、上水への依存が残ると共に、水不足となった場合、樹木の枯死の可能性が高くなる。

そこで余剰水を人工湖に貯留し、修景用として利用しつつ、余剰水処分には、人工湖に貯留した水を高い蒸発散を利用して処分するものである。ただし、人工湖には修景用水としての機能も持たせるため、常時、人工湖に余剰水が貯留されている状態を条件とする。

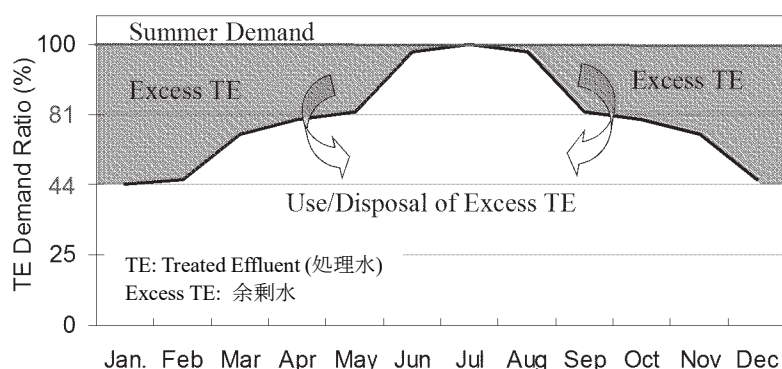


図2.4.5 下水処理水供給量と余剰水

表2.4.1 対象地域における再生水利用用途の評価

利用用途	長所	短所	考察	評価
1) 散水用水	<ul style="list-style-type: none"> 再生水の利用先として需要量は大きい 再生水の散水利用の実績があることから導入しやすい 上水道の使用量を抑えることが出来る 	<ul style="list-style-type: none"> 需要水量が季節により変動する 再生水と人との接触、散水設備の詰まり、噴霧器による病原菌やウイルスの伝播、土壌への悪影響、地下水汚染が起り得る そのため散水用水の水質基準を満たさなければならない 	<p>対象地域では需要量が見込まれるため、再生水の利用先としては有効である。人との接触や土壌汚染の可能性があるため、適切な処理水質を保つ必要がある。また、処理水質が悪化した場合は、配水の即時停止、周知等の措置を取る必要がある。余剰水の利用先を確保できれば利用用途として有望である。</p>	採用
2) 農業用水	<ul style="list-style-type: none"> 緑地への散水施設と併用可能 水源確保のため、需要あり 再生水利用により農業生産額の増加に寄与 	<ul style="list-style-type: none"> 小規模の農場が点在しているため、需要量は少ない 農業用水適用の水質が求められる 需要水量が季節により変動する 作物への窒素の取り込みと塩への耐性を考慮する必要がある 処理水質悪化に伴う作物の商品価値が下がる可能性がある 塩類集積の可能性はある 	<p>多大な需要が見込めないが、緑地散水と施設を併用することでコストを削減できる。また、作物への影響は、農業用水質基準を順守し、かつ使用する作物を選定すれば影響を最小限に抑えられる。処理水質が悪化した場合は、配水の即時停止、周知等の措置を取る必要がある。また、ナツメヤシ等の塩類に耐性のある作物の選定する必要がある。</p>	採用
3) 修景用水	<ul style="list-style-type: none"> 噴水への利用は需要量が少ないが、湖や池への修景用であれば需要量は大きい 水とのふれあい場の創出や環境改善を期待できる 	<ul style="list-style-type: none"> 既存の噴水やせせらぎ、湖が存在しないため、建設が必要 池、湖において、再生水への人の接触、蒸発による塩分濃度上昇と富栄養化が考えられるため、高水準の水質基準が求められる 地下水への影響の可能性はある 	<p>修景用水として湖や池への利用では、需要量が大きく見込める。また、余剰水の利用(貯留)先としても人工湖・池への適用が妥当である。ただ、人工湖の建設、その用地、また高水準の水質基準を満たす必要があり、コストがかさむ。地下水への影響しないよう人工湖の底板に浸透防止のシートなどで覆う必要がある。</p>	湖への利用を採用
4) 工業用水	<ul style="list-style-type: none"> 工業用水での要求水質の幅は広く、再生水が適用できる可能性は高い 上水の節約が可能 人との接触が少ない 	<ul style="list-style-type: none"> 対象地域に用水型工場の立地は少なく、需要量は多くない 再生水の配管の整備が必要 配管の誤接続や腐食、不純物の沈殿、病原菌の繁殖が起り得る 	<p>工場内の利用のため、人との接触は制限できる。誤接続や配管内の問題も起り得るため、確実な工事と水質基準の厳守が求められる。また、対象地域において、再生水が導入可能な用水型の工場は現在確認されていない。</p>	不採用
5) 水洗用水	<ul style="list-style-type: none"> 上水の節約が可能 需要量の季節変動が比較的少ない 低質な処理水質でも適用可能。ただし二次処理水質以上のレベルは求められる 	<ul style="list-style-type: none"> 二系統配管システム(上水と再生水の配管)が必要であり、コストが高い 既設の建築物には大規模な配管工事が必要 配管の誤接続や腐食、不純物の沈殿、病原菌の伝播等の問題が起り得る 	<p>需要量の変動が小さいため、再生水の供給調整が容易になるが、二系統配管システムのコスト(高)や誤接続等の問題がある。特に誤接続は人々の健康被害に関わるため、確実な配管工事が求められる。対象地区では家庭への配水が主となるが、誤接続やコスト負担等の問題がある。</p>	不採用
6) 地下水涵養	<ul style="list-style-type: none"> 地下水位減少の改善や沿岸域への海水の侵入防止が可能 非常に大きい再生水の需要が見込める 	<ul style="list-style-type: none"> 帯水層へ再生水を涵養する設備が必要 対象地域が地下水保護地域に指定されているため、非常に高水準の処理水質が要求される 再生水の地下水補充により、地下水が汚染された場合、水質を回復させることは困難 地下水水量に対して再生水量が小さい場合は、効果が期待できない 	<p>地下水位減少(枯渇の回避)や海水の浸入を防ぐ可能性はある。しかし、地下水保全地域に指定されているため地域では導入は難しく、効果も保障されていない。非常に高度な処理水質や涵養設備も必要のため、コストが高くなると予想される。</p>	不採用

3) 上水使用量

対象地域において再生水の供給可能量は、2045年で37,613m³/日と仮定する。この値は、発生する下水処理水から場内ロス10%、配水ロス10%を差し引いたものである。本検討では、この供給可能量相当の水需要量が対象地域に存在すると仮定して、下水処理水を優先的に利用し、再生水供給不足分は上水にて補完するものとする。水需要に対する上水と処理水の供給量の推移を図2.4.6に示す。下水処理水の増加に伴い、上水への依存が軽減し、2045年には散水用水の水源が上水から再生水に取って代わる。

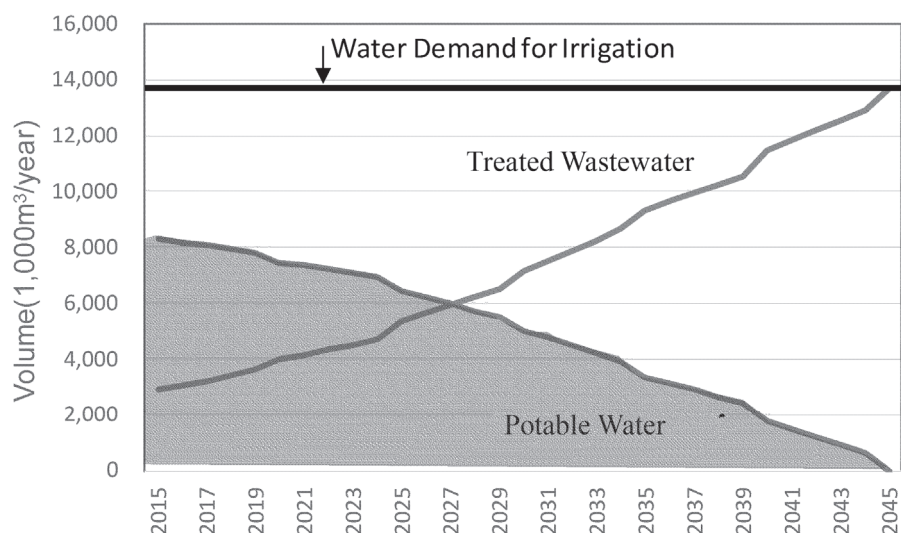


図2.4.6 上水と再生水の推移

4) Case 1の必要施設

必要とする施設として、下水処理水を散水する施設、人工湖（修景用）であり、加えて、要求される処理水質は散水・農業用水の水質基準を満たすために高度処理施設を必要とする。本検討では、下水の二次処理までを標準処理フローとし、再生水利用を考慮した場合、二次処理施設の後段に高度処理施設を設置し、二次処理水を高度処理することを想定している。再生水は散水・農業用水利用を目的とすることから、大腸菌群数、寄生虫卵除去のため、膜分離活性汚泥法（MBR法：Membrane Bioreactor）を採用する。

また、費用として図2.4.6に示す上水使用料を見込む。これら再生水利用に係る費用を算出した。

図2.4.7にCase1のシステムを示す。

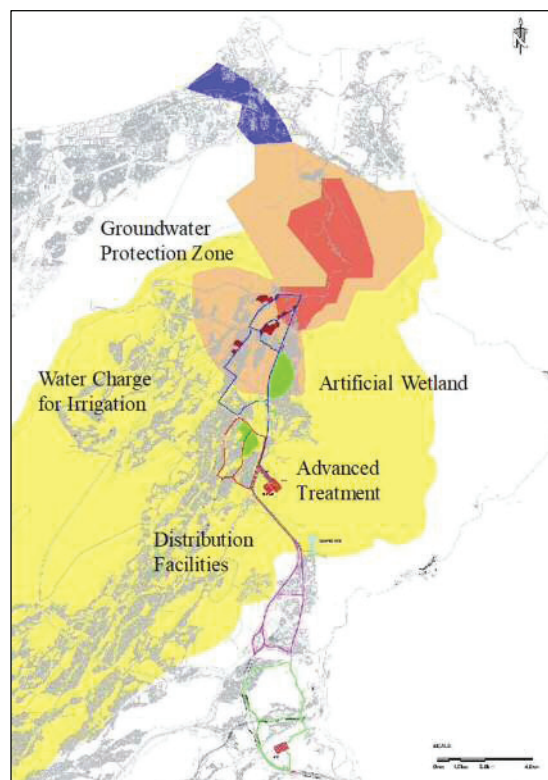


図2.4.7 Case 1の再生水システム

(b) Case 2 海へ全量放流処分

1) 処理水の処分方法

本ケースは、下水処理水の地下水保全区域内での放流を避けるため、処理水全量を系外の海へ放流・処分するシステムである。図2.4.8にCase2の処分システムを示す。

2) 上水道使用量

対象地域での緑地への散水には下水処理水ではなく上水を使用することから、散水用の上

水使用量を見込む。

3) Case 2の必要施設

処理水の送水管経路は STP-2 から STP-1 付近の合流点，さらに放流先である海域までの計 36.1km の送水を想定する。必要施設は，処理水の送水管と送水ポンプ場である。要求される下水処理水質は，海への放流のため高度処理レベルの水質を不要とし，二次処理（付加施設なし）とする。緑地への散水には，上水を利用することからその費用を見込む。

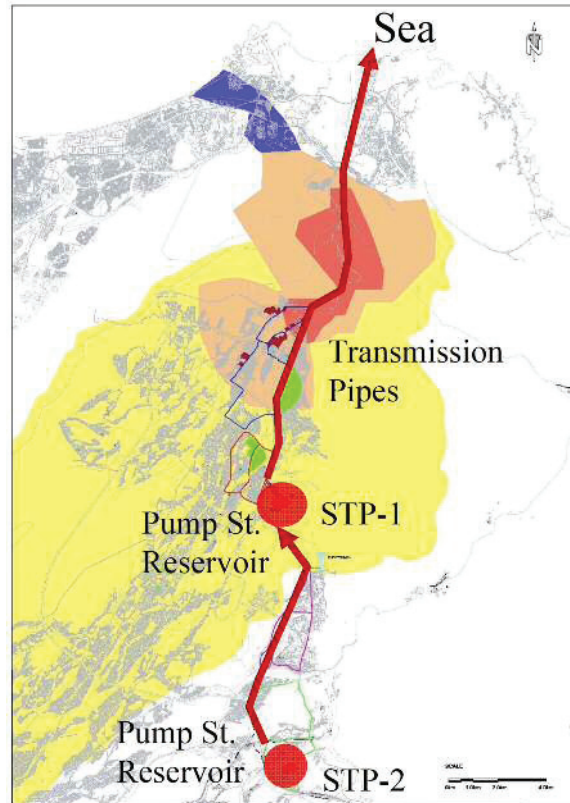


図 2.4.8 Case 2 処理水処分システム

(c) Case 3 系内での全量蒸発処分

1) 処理水の処分方法

本システムは，下水処理水を再利用せず，かつ系内で全量を処分するものである。その下水処理水処分用に人工湖を建設し，対象地域の高い蒸発散量を利用し，下水処理水を全量蒸発して処分するシステムである。

人工湖は，STP 付近にそれぞれ建設するため 2 箇所とする。下水処理場からの処理水を全量人工湖に放流し，蒸発処分する。この人工湖は余剰水を貯留し蒸発処分する機能を優先することから，Case 1 の人工湖に修景を目的とせず，常時貯留することを要件としない。ただし，貯水時は付加的に修景用水の効果を得られる。要求水質は，人工湖が閉鎖域となることから水質悪化，悪臭などを極力避けるため高度処理レベルとする。図 2.4.9 に Case 3 の処分システムを示す。

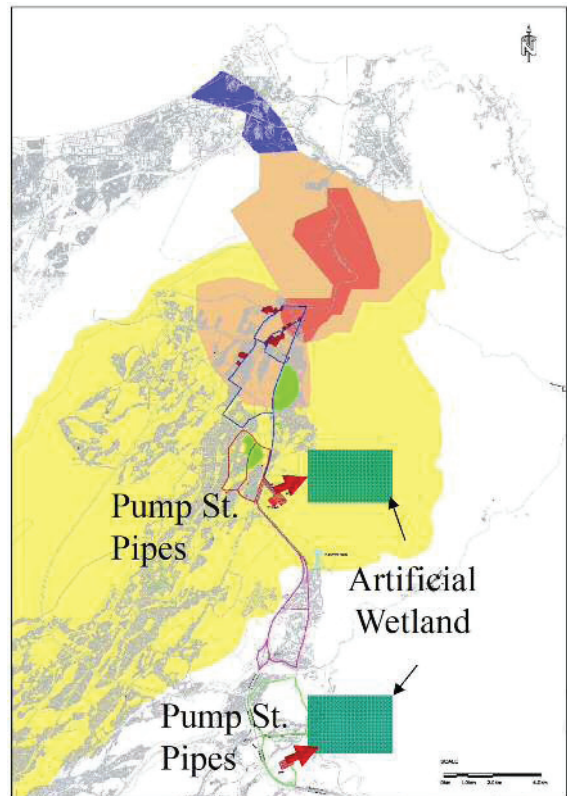


図 2.4.9 Case 3 処理水処分システム

2) 上水使用量

対象地域での緑地への散水には下水処理水ではなく上水を使用することから、散水用の上水使用量を見込む。

3) Case 3の必要施設

下水処理水を全量人工湖に放流するための施設は、人工湖、送水管及びポンプ場である。また、緑地への散水には、上水を利用することからその費用を見込む。

(d) Case 4 系外への全量送水及び再利用

1) 再生水の利用用途

本システムは、下水処理水全量を地下水保全区域から系外の地域へ送水し、既設の再生水配水施設に接続し、再利用するものである。下水処理水は STP-1, STP-2 で高度処理した後、送水先の既存施設を利用して緑地等への散水用水として利用する。図 2.4.10 に Case 4 の処理システムを示す。

2) 余剰水の処分方法

系外での余剰水は海域へ放流する。

3) 上水使用量

対象地域での緑地への散水には下水処理水ではなく上水を使用することから、散水用の上水使用量を見込む。

4) Case 4の必要施設

必要とする施設は、下水処理水を系外へ送水する施設（送水管、ポンプ場）である。また、要求される処理水質は散水・農業用の水質基準を満たすために高度処理施設を必要とする。系内での緑地への散水には、上水を利用することからその費用を見込む。

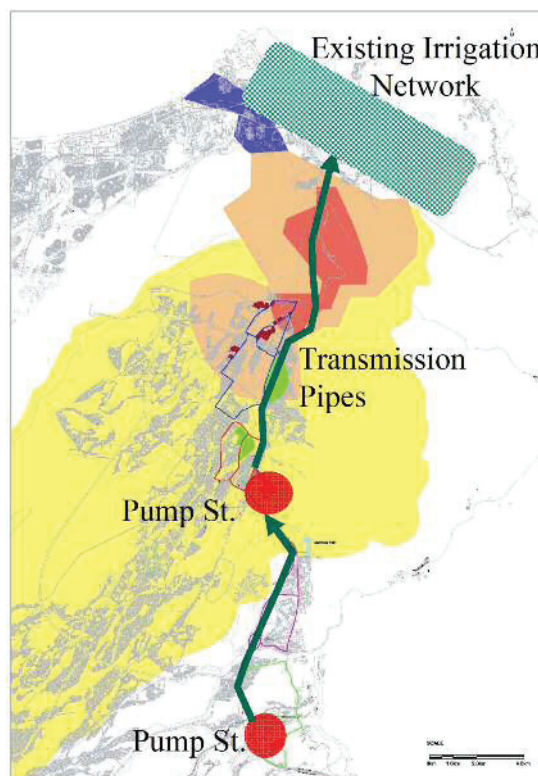


図 2.4.10 Case 4 処理水再利用システム

(2) 各Caseの概要

各 Case の概要と費用として計上する施設を表 2.4.2 に示す。なお、各 Case で共通する施設、たとえば二次処理施設などは共通施設として費用に計上しない。また、検討対象期間は供用開始 2015 年から目標年次である 2045 年までの 31 年間とする。ただし、費用比較の観点から、本検討では割引率は考慮しない。

表2.4.2 各Caseの概要

Case	下水処理水の再利用			
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
概要	再生水として散水と修景利用	STPから海まで送水し、全量放流	人工湖で全量蒸発処分	系外へ送水し、再利用
模式図				
建設費 & 維持管理費	長所	高度処理、散水施設が不要なため、建設費、維持管理費が抑えられ	散水施設や送水管が不要	散水施設や人工湖が必要ない 送水距離がCase 2より短く、建設費が廉価
	短所	再利用のため高度処理が必要 散水施設と余剰水放流先の人工湖を建設	散水のための上水費用	再利用のため高度処理施設が必要 系内で散水のための上水費用
必要施設	散水用の上水	○(>Case 1)	○(>Case 1)	○(>Case 1)
	高度処理	○		○
	散水施設	○		
	修景利用の人工湖	○		
	海までの送水施設		○	
	蒸発用人工湖			○
	人工湖への送水施設			○
	系外への送水施設			○
維持管理	○(>Case 2)	○	○(>Case 2)	○(>Case 2)

2.4.4 最適な再生水利用・処分システムの検討

再生水の利用は緑地への散水であり、Case 1 から 4 のシステムでは、再生水の不足もしくは利用しない場合、緑地の水需要量の一部もしくは全部を上水で補完する。高度処理施設は Case 2 以外では必須となる。

そこで各 Case で必要な施設の概略建設費及び運転維持管理を算定し、費用面で評価する。

(1) Case 1 再生水利用

1) 高度処理

下水の再利用において考慮すべき水質は、主に微粒子物質や有機物、栄養塩及び病原性微生物などである。散水利用に対し、細菌、原虫の除去が重要であること、下水の二次処理の後段に付加する高度処理に省スペース化が求められることから、本検討では膜分離活性汚泥法を高度処理として想定する。

MBR の建設は下水量の増加に応じて増設し、膜の耐用年数は 10 年とした。図 2.4.11 及び 2.4.12 に STP-1, STP-2 の流入水量に対する MBR の段階的建設計画を示す。STP-1, 2 とも 2045 年の計画流入水量に対して 4 段階による MBR の増設となる。これに加えて膜の更新を費用に加算する。

表 2.4.3 に各 STP における MBR の段階別概略建設費とその合計を示す。31 年間で改築更新を含め、STP-1 で約 76.4 百万 US\$, STP-2 で約 23.9 百万 US\$ となり、合計約 100.3 百万 US\$ となった。

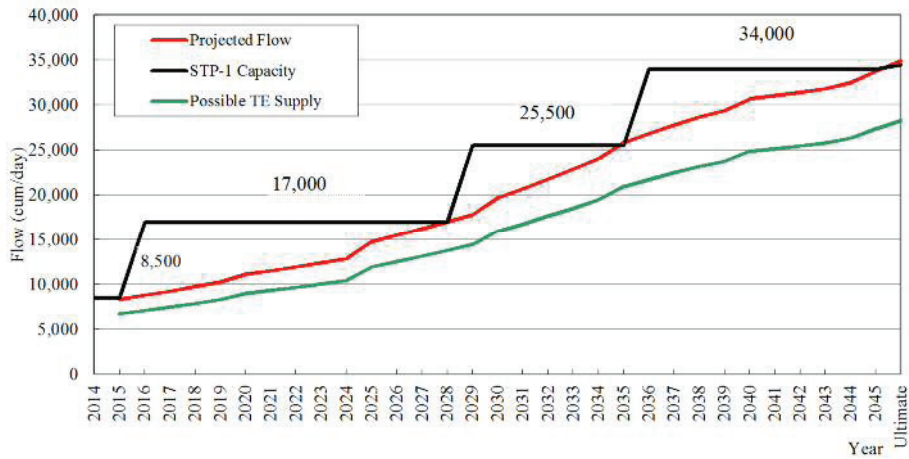


図2.4.11 STP-1への流入水量とMBR段階的建設計画

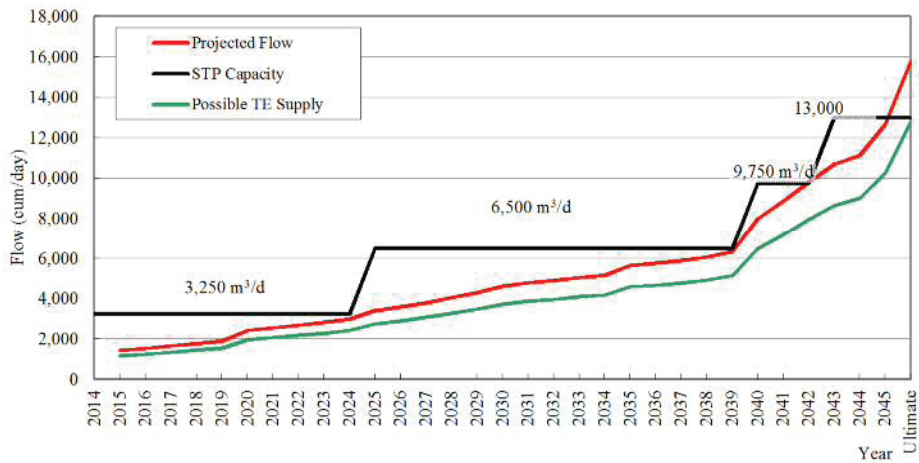


図2.4.12 STP-2への流入水量とMBR段階的建設計画

表2.4.3 高度処理施設の建設計画と概略建設費

STP-1	MBR (8,500m³/日)	MBR-1	MBR-2	MBR-3	MBR-4	計
	建設年度	2015	2016	2029	2035	
	下水量 (m³/日)	8,331	8,789	17,830	25,873	
	更新回数	3	2	1	1	
	コスト(百万US\$)	27.8	20.8	13.9	13.9	76.4

STP-2	MBR (3,250m³/日)	MBR-1	MBR-2	MBR-3	MBR-4	計
	建設年度	2015	2025	2040	2042	
	下水量 (m³/日)	1,439	3,395	7,997	9,813	
	更新回数	3	2	0	0	
	コスト(百万US\$)	10.6	8.0	2.7	2.7	23.9
建設費用計(百万US\$)						100.3

2) 散水配水施設の建設費

散水対象の緑地と農地及び配水施設（送・配水管，高架水槽）の位置を図 2.4.13 に示す。配水施設の構成は，配水管，再生水の配水池，配水ポンプ場，高架水槽，配水用タンカーステーションである。配水タンカーは，配水管ルート外の需要地に配水する役割を持つ。

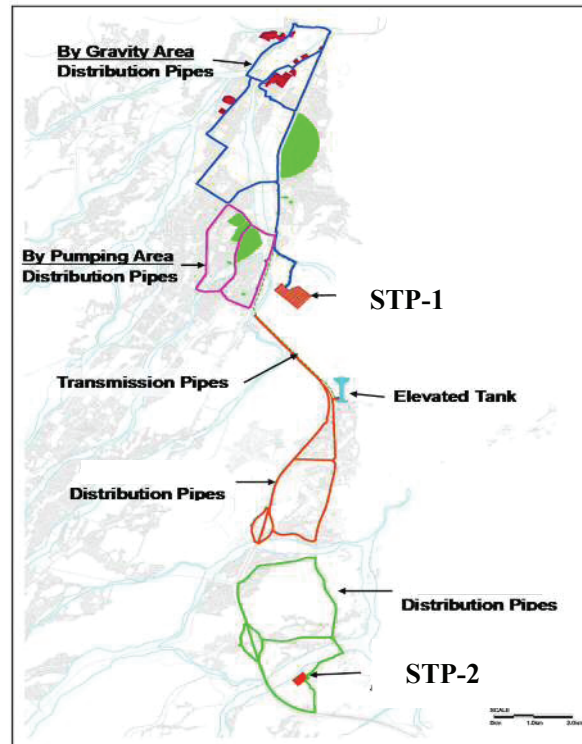


図2.4.13 再生水配水施設の位置

対象区域では河川があり，乾期には表流水はないものの雨期には短時間の降雨で洪水が起きる場合がある。複数の河川横断部では，このような洪水で配水管が破損する恐れがある。そこで河川横断部箇所を少なくすると共に，一部の配水管が破損しても補完できるよう，また行き止まり管による水質の悪化を防ぐためループ化した⁴⁰⁾。

配水施設の構成と建設費用を表 2.4.4 に示す。STP-1, STP-2 の処理区域で再生水の配水施設構成は，地形により異なる。なお，耐用年数は土木・配水管 50 年，機械電気設備 15 年と設定した。積算について，配管は，口径別 m 当たり単価（材料・工事費）に口径別延長を乗じた。土木建設費は数量を計算し，単価を乗じた。機械・電気は数量とメーカーヒアリングによる単価を乗じた。

配水施設の概略建設費合計は，約 21.5 百万 US\$ となった。

表2.4.4 配水施設と概略建設費用

処理場	施設	内訳	建設コスト(百万US\$)
STP-1	配水管	32,104m	4.3
	配水池	32,000m ³ ×2池	1.8
	ポンプ場	ポンプ6台	2.7
	タンカーステーション	2カ所	0.1
STP-2	送水管	14,060m	4.0
	配水管	35,532m	4.2
	配水池	7,000m ³ ×4池	1.6
	ポンプ場	ポンプ3台	1.6
	高架水槽	1,500 m ³	0.8
	タンカーステーション	4カ所	0.2
		合計	21.5

3) 高度処理とポンプ場の運転維持管理費

高度処理の運転維持管理には電気代と MBR 膜洗浄と塩素消毒用の薬品費を計上する。また、各 STP での再生水を配水・送水するポンプの電気代を見込む。単価は必要電力、薬品費及び電気代は現地単価を用いた。

ここで本検討では、ポンプの電力に対する負荷率は 0.9 に 0.75 を乗じたものとする。これは再生水需要量の季節変動を考慮しており、夏期に対する年間平均は 75%と想定した。対象期間 31 年間の計画汚水量に基づいて算出した結果、高度処理とポンプ場の維持管理費は 9.7 百万 US\$となる。一方、配水ポンプの電力消費は、高度処理と同様の計算で消費電力に負荷率を乗じた。その結果、STP-1,STP-2 での配水ポンプ電気代は約 1.1 百万 US\$となった。よって、Case1 での運転維持管理費は合計約 10.8 百万 US\$となる。

表2.4.5 高度処理の維持管理費

	必要電力 (kWh/m ³)	電気代 (US\$/kWh)	コスト (百万US\$)
STP-1処理区 の下水水量 228.7百万m ³	0.84	0.04	7.1
	薬品 (US\$/m ³)		
	0.003		0.6
計			7.7
STP-2処理区 の下水水量 57.0百万m ³	0.84	0.04	1.8
	薬品 (US\$/m ³)		
	0.003		0.2
計			2.0
合計(STP-1&STP-2)			9.7

4) 人工湖の建設

計画対象地域において処理水の放流を禁止している条件の下で、水需要の季節変動で生じる再生水余剰の利用、処分が重要となる。そこでこの余剰水を修景用水として利用し、かつ乾燥地域の気候特性を利用してその高い蒸発散量に着目し、余剰水を蒸発して処分する方法

を提案した。春秋と冬期に発生する余剰水を人工湖に貯留し、高い蒸発散量で蒸発させる。図 2.4.13 に人工湖に貯留した余剰水量の推移を示す。ここでは便宜上、湖面積を 3 パターンに分け、面積の大きさにより蒸発散量が異なり、必要とされる人工湖容量も異なる。

余剰水を蒸発による処分のみを目的とすれば、人工湖の湖面積が大きい施設を 1 池建設すればよいが、図 2.4.14 のように 2035 年までは夏期に蒸発し、池は空となる。

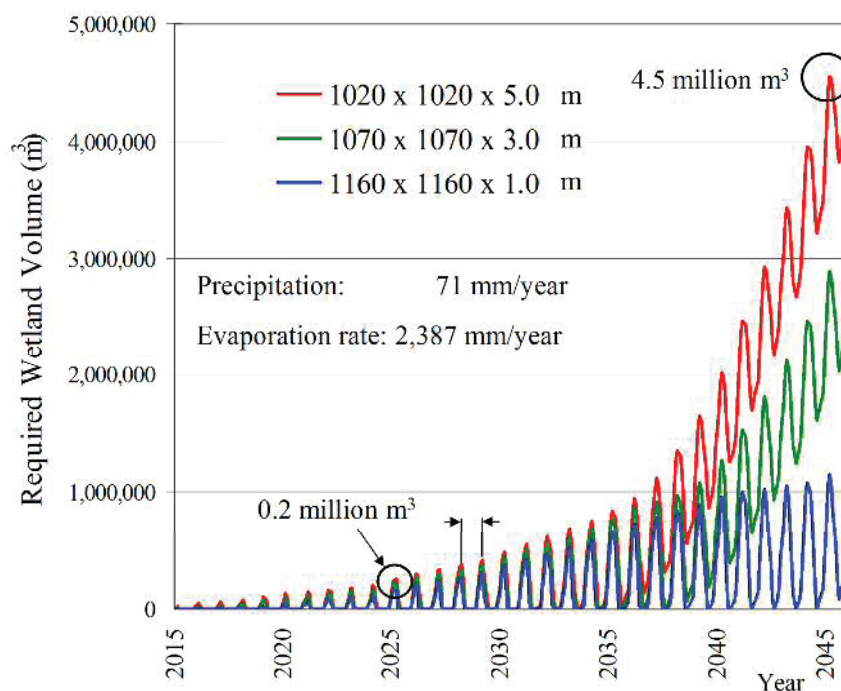


図2. 4. 14 人工湖の必要容量

そこで、修景用水としての利用を考慮して、湖水は干上がらないよう常時貯水しておく。そのため年間の余剰水の増加より人工湖は段階的の建設とし、分割される人工湖は同一形状とする。ここで分割数は 1, 3, 6 とし、水深をそれぞれ 3m, 5m, 7m とし計 9 つのシナリオで検討した。湖の水量は次式の考えで計算し、余剰水が貯留容量を越えるときに増設する。なお、人工湖は余剰水の貯留の容易性から STP-1, STP-2 近傍のそれぞれで建設するものとする。

$$(\text{各月の発生水量}) \times (1 - \text{各季節の需要水量の比率}) - (\text{各月の蒸発散量} \times \text{湖面積}) = \text{湖の水量}$$

なお、人工湖の建設費算出は形状から土工量（掘削など）を積み上げ、現地の単価を乗じた。積算根拠となる形状と土工の根拠を表 2.4.6 及び図 2.4.15 に示す。

表2.4.6 人工湖積算根拠

a=	1030 m								
h=	7 m								
Item ref.									
No.1	$(a + 1.8h \times 2 + 20 \times 2)^2 - (a + 1.8h \times 2)^2$							86,016	m ²
No.2	$((a + 3.6h) + 20 \times 2)^2 - a^2$							138,563	m ²
No.3	$a^2 \times (h + 1) + 1.8 \times (h+1) \times (h+1) \times 1/2 \times (a + 3.6 \times (h + 1)) \times 2 + 1.8 \times (h+1) \times (h+1) \times 1/2 \times a \times a$							8,727,830	m ³
No.4	25% of No.3							2,181,957	m ³
No.5	20% of No.4							436,391	m ³
No.6	Same as No.5							436,391	m ³
No.7	(No.3 + No.4 + No.5 - No.6)							10,909,787	m ³
No.8	$\sqrt{(h^2 + (1.8h)^2)} \times (a + 3.6h) \times 2 + \sqrt{(h^2 + (1.8h)^2)} \times a \times 2$							60,112	m ²
No.9	1.5 times of No.8							90,167	m ²
No.10	a ²							1,060,900	m ²
No.11	a ²							1,060,900	m ²
No.12	a ² x 0.1							106,090	m ³
No.13	a ² x 0.075							79,568	m ³

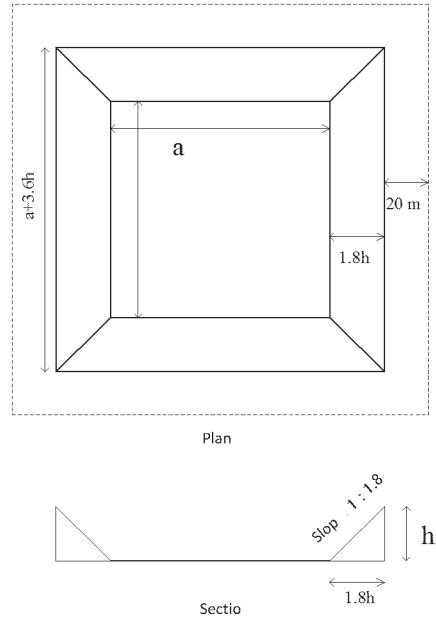


図2.4.15 人工湖形状

表2.4.7にSTP-1, 表2.4.8にSTP-2の各9つのシナリオでの段階的建設年と概略建設費用を示す。

表2.4.7 人工湖の段階的建設と概略建設費用 (STP-1)

シナリオ	1辺の長さ(m)	建設年						総容積 (m ³)	総コスト (百万US\$)
		1期	2期	3期	4期	5期	6期		
1	450	2015	2017	2025	2031	2035	2039	3,645,000	73.4
2	440	2015	2018	2026	2031	2035	2039	5,808,000	107.4
3	440	2015	2019	2027	2032	2036	2041	8,131,200	145.7
4	650	2015	2025	2036				3,802,500	75.2
5	600	2015	2026	2037				5,400,000	97.8
6	590	2015	2027	2037				7,310,100	127.9
7	1,030	2015						3,182,700	62.0
8	980	2015						4,802,000	85.1
9	940	2015						6,185,200	105.4

表2.4.8 人工湖の段階的建設と概略建設費用 (STP-2)

シナリオ	1辺の長さ(m)	建設年						総容積 (m ³)	総コスト (百万US\$)
		1期	2期	3期	4期	5期	6期		
1	240	2015	2021	2029	2034	2041	2042	1,036,800	22.0
2	230	2015	2021	2028	2034	2040	2042	1,587,000	31.5
3	230	2015	2022	2029	2035	2041	2043	2,221,800	43.4
4	330	2015	2029	2042				980,100	20.2
5	310	2015	2029	2040				1,441,500	31.0
6	300	2015	2029	2040				1,890,000	35.4
7	570	2015						974,700	19.4
8	530	2015						1,404,500	25.6
9	500	2015						1,750,000	31.0

STP-1, STP-2 で供水しているのは、建設費が最も安価なのはシナリオ7である。しかし、シナリオ7-9では人工湖が1池であるため、供用開始当初から20年間、貯留余剰量に対し

て蒸発散量（湖面積）が大きいため人工湖が空となり，修景用水の機能を果たさない．またシナリオ4-6（人工湖は3池）においても供用開始の5年間，人工湖が空となる．そこで常時，貯水状況にあり人工湖を修景用水として利用でき，かつ最も安価で余剰水を処分できるシナリオは1となる．STP-1, 2ともシナリオ1を採用し，その概略建設費合計は約95.4百万US\$となる．

5) 上水使用料

対象地域において散水用水としての水需要量は，2045年には37,613m³/日になる⁴¹⁾．この水需要量相当の緑地が本地域に存在すると仮定して，処理水を優先的に利用し，再生水供給不足分は上水にて補完する．計算方法は，全ての緑地の水需要量から再生水供給可能量を引き，各季節の水需要率（夏期：100%，春秋期：81%，冬期：44%）を乗じる．

(2045年の再生水供給可能日量 - 各年の再生水供給可能日量)

$$\times \text{各月日数} \times \text{各期水需要比率} = \text{上水量}$$

再生水供給量と必要上水量の推移は図2.4.5（前出）に示すとおりである．

散水利用での上水使用量は，31年間で約148.9百万m³（31年間）になる．一方，1m³当たりの水道料金は1.14US\$から1.71US\$の範囲^{29), 42)}であり，本検討では1.22US\$/m³を採用⁴³⁾した．上水道使用料の総費用は約182.4百万US\$となる．

6) Case 1の総費用

Case 1の総費用及び各施設の内訳を図2.4.16に示す．総費用は約410.2百万US\$であり，うち上水道料金が45%を占め，高度処理費用と人工湖の割合がほぼ同じ値になった．

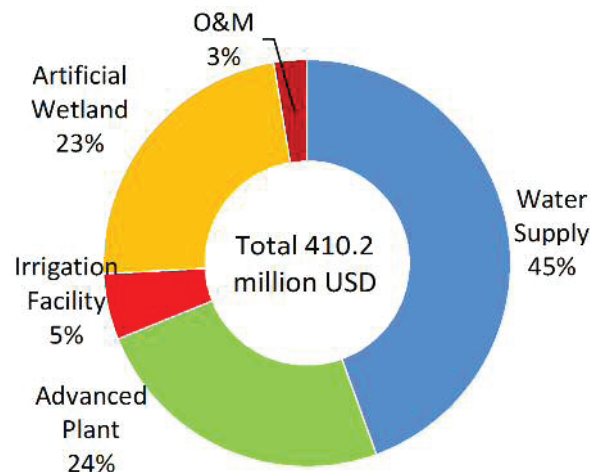


図2.4.16 Case 1の総費用と内訳

(2) Case 2 処理水全量を海へ放流

Case 2では処理水を再利用せず海へ放流し，系内の散水用水は全て上水でまかなうもので

ある。

海への放流は、STP 間を結ぶ送水管を通じてポンプにより圧送し、海へ放流する。費用としては送水管、送水ポンプ場さらに散水用の上水量が対象となる。

1) 費用算出

対象施設は、送水管 36.1km, ポンプ場 2 箇所 (ポンプ台数 6 台と 4 台), これにポンプ場の運転維持管理費 (電気代) を計上する。対象期間は 31 年間である。

費用算出方法は、Case1 と同様に、送水管は単価に管渠延長を乗じた。ポンプ場は 2 箇所必要とし、土木は数量を算出し、単価を乗じた。機械電気機器も単価と数量 (ポンプ台数, 機器数) を乗じて算出した。

2) 上水道使用料

Case2 では下水処理水を再利用しないため、緑地に必要な水は全て上水で補完することとなる。31 年間で必要水量は約 399.9 百万 m³ となり、その費用は約 400 百万 US\$ に達する。

3) Case 2 の総費用

表 2.4.9 及び図 2.4.17 に Case 2 の総費用及び内訳を示す。上水道料金が総費用に対して占める割合は 95% となり、下水処理水処分に係る費用を大きく上回っている。一方で、このケースは上水道料金の変動に大きく左右される。そのため最後に上水道料金変動に伴う感度分析を行った。

表2.4.9 Case 2の費用

項目	費用	備考
送水管建設費	13.3百万US\$	
ポンプ場建設費	5.0百万US\$	
ポンプ場維持管理	1.6百万US\$	31年間
上水使用料	399.7百万US\$	31年間
計	419.8百万US\$	

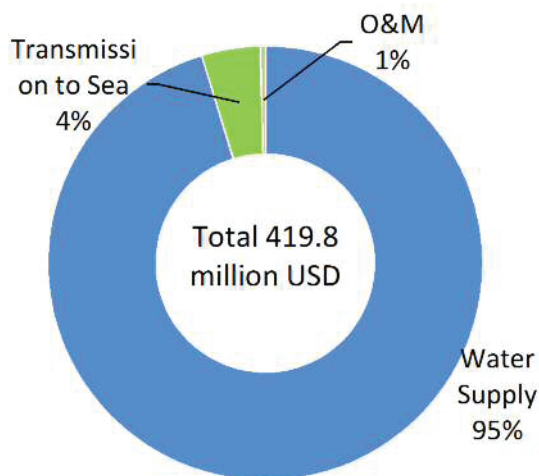


図2.4.17 Case 2の総費用と内訳

(3) Case 3 処理水全量を人工湖で蒸発処分

Case 3 では、処理水を系内で貯留し蒸発処分する人工湖を建設する。Case 1 の湖との違いは、人工湖を修景用水として利用しないことから、常時貯水を必要としない。また、系内での処理水の再利用は行わないことから、人工湖の規模はやや大きくなる。

シナリオは Case 1 と同様とし、表 2.4.7 及び表 2.4.8 の結果から最も安価となるのは、シナリオ 7 であった。これは 1 池の建設と湖面積が大きい（水深が浅い）ため、スケールメリットの効果と蒸発散量を確保出来たためといえる。

1) 費用算出

対象施設は、高度処理施設、人工湖 2 池（各 STP）、ポンプ場 1 箇所（ポンプ台数 4 台）、これにポンプ場の運転維持管理費（電気代）を計上する。対象期間は 31 年間である。

費用算出方法は、Case 1 と同様に、送水管は単価に管渠延長を乗じた。高度処理施設は Case 1 と同値なる。ポンプ場は 2 箇所必要とし、土木は数量を算出し、単価を乗じた。機械電気機器も単価と数量（ポンプ台数、機器数）を乗じて算出した。

2) 上水道使用料

Case 3 でも下水処理水を再利用しないため、緑地に必要な水は全て上水で補完することとなる。費用は Case 2 と同値となる。

3) Case 3 の総費用

表 2.4.10 及び図 2.4.18 に Case 3 の総費用及び内訳を示す。上水道料金が総費用に対して占める割合は 47% となり、人工湖の建設も 40% を占める結果となった。本ケースも上水道料金の変動に左右される可能性があるため、他のケースとともに上水道料金変動に伴う感度分析を行った。

表 2.4.10 Case 3 の費用

項目	費用	備考
高度処理施設建設費	100.3百万US\$	
人工湖建設費	336.5百万US\$	
送水管・ポンプ場建設費	0.7百万US\$	
ポンプ場建設費	1.3百万US\$	
運転維持管理費	9.8百万US\$	31年間
上水使用料	399.7百万US\$	31年間
計	848.3百万US\$	

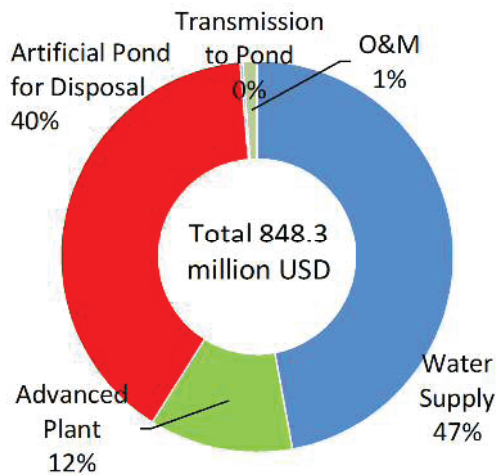


図2.4.18 Case 3の総費用と内訳

(4) Case 4 処理水全量を系外へ送水再利用

Case 4 では処理水を系外搬出し、既存の再生水施設へ処理水を供給するものである。

1) 費用算出

対象施設は、高度処理施設、送水管 8km、ポンプ場 2 箇所（ポンプ台数 6 台、4 台）、これに高度処理施設及びポンプ場の運転維持管理費を計上する。対象期間は 31 年間である。

費用算出方法は、Case1 と同様に、送水管は単価に管渠延長を乗じた。高度処理施設は Case 1 と同値なる。ポンプ場は 2 箇所必要とし、土木は数量を算出し、単価を乗じた。機械電気機器も単価と数量（ポンプ台数、機器数）を乗じて算出した。

2) 上水道使用料

Case4 では、下水処理水を再利用するが、全量を系外に送水するため、対象地域では緑地に必要な水は全て上水で補完することとなる。費用は Case 2 と同値となる。

3) Case 3の総費用

表 2.4.11 及び図 2.4.19 に Case 4 の総費用及び内訳を示す。上水道料金が総費用に対して占める割合は 76%となり、総建設費の 2/3 を占める。本ケースも下水処理水を再利用するが系外での利用となり、対象区域（系内）では散水用水として上水による補完となる。

表2.4.11 Case 4の費用

項目	費用	備考
高度処理建設費	100.3百万US\$	
送水管・ポンプ場建設費	17.9百万US\$	
運転維持管理費	9.8百万US\$	31年間
上水使用料	399.7百万US\$	31年間
計	527.8百万US\$	

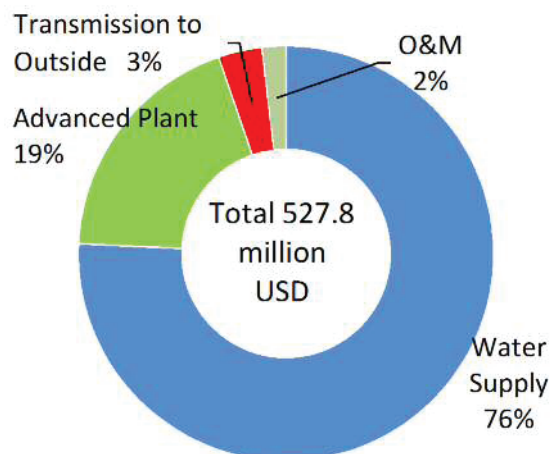


図2. 4. 19 Case 4の総費用と内訳

2. 4. 5 最適な再生水システム

(1) 費用面での評価

これまで検討した Case 1 から 4 について、下水処理水の処分・再利用のための施設建設費及び運転維持管理費を表 2.4.12 及び図 2.4.20 に示す。

4 ケースの中で最も費用が安価であったのは Case 1（全量再利用）である。Case 2 から 4 では、総費用に対して上水費用のウェイトが高い。これは評価期間である 31 年間で、再生水の代わりに散水用上水道料金の累積額が大きくなったことが原因である。換言すれば、再生水利用のため施設整備には初期投資は大きいものの、長期間で評価すればウェイトが大きい上水費用を再生水で代用することで費用は抑えることが出来るといえる。

Case 1 では、供用開始の初期段階では再生水の供給量は少なく、上水に依存するが、費用総額で見れば上水の占める割合は約 45%と他のケースと比較して最も低い。さらに Case 1 の人工湖の役割は、単なる余剰水を蒸発処分するだけでなく、修景としても機能している。

表2. 4. 12 各Caseの総費用

ケース	下水処理水を活用	下水処理水を処分・処理			
	Case 1 再生利用	Case 2 海へ全量放流	Case 3 系内で全量蒸発	Case 4 系外へ全量送水	
概要	再生水として散水と修景利用	STPから海域まで送水し、全量放流処分	処分用の人工湖を造り、全量蒸発	系外へ送水し、再生水利用。余剰は海域へ	
必要 コスト (百万 US\$)	Water Supply	182.4	399.7	399.7	399.7
	Advanced Plant	100.3		100.3	100.3
	Irrigation Facility	21.4			
	Artificial Wetland	95.3			
	Transmission to Sea		18.3		
	Artificial Pond for Disposal			336.5	
	Transmission to Pond			2.0	
	Transmission to Outside				17.9
	O&M	10.8	1.6	9.8	9.8
計 (million USD)	410.2	419.6	848.3	527.8	

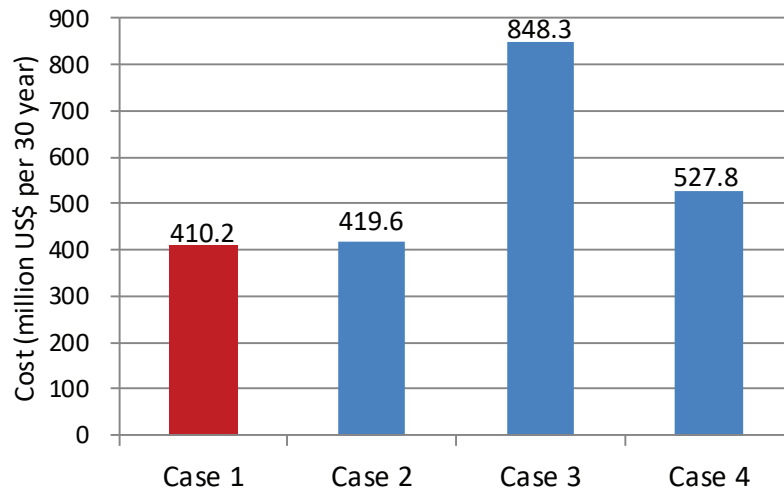


図2.4.20 各Caseの総費用

(2) 再利用によるクローズドシステム

下水処理水を全量再利用することにより、対象地域でのクローズドシステムを構築することが可能となった。図2.4.21に対象地域でのクローズドシステムを示す。

乾燥地域では、水量が限られている地下水には依存することは難しく、その枯渇と地下水汚染を防ぐためにも地下水保全が求められる。そこで主な水源を海水淡水化に依存することで、都市部へ給水することができる。その後、都市域から排出される下水は二次処理後にその処理水を再利用のため高度処理し、需要地に供給（本研究では散水利用）する。季節変動により需要が減少し余剰水が発生した場合は、人工湖に余剰水を貯留し修景用水として使用する。また、乾燥地域特有の高い蒸発散量により潮流された余剰水は蒸発し、処分することができる。

図2.4.2に示した現況（下水処理水の未利用かつ排水）に対して、地下水資源の保全だけでなく、枯渇・汚染の防止、再生水利用による経済性の利点、修景機能の付加価値が期待できる。

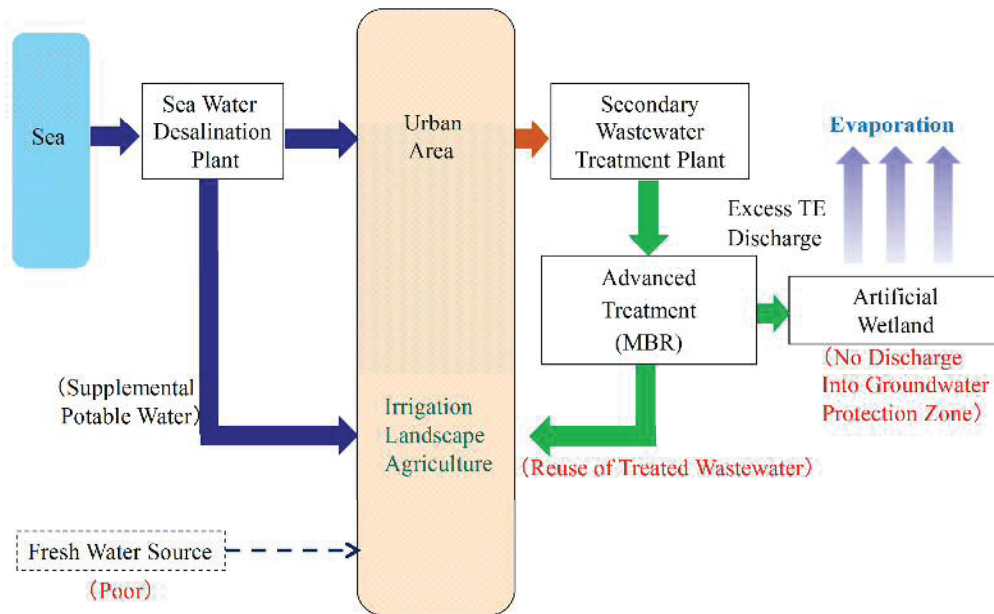


図2. 4. 21 対象地域での最適な水循環システム（クローズドシステム）

2. 4. 6 上水道料金変動による感度分析

Case 1 と Case 2 の差額は 9.4 百万 US\$ で、Case 1 の総額に対してわずか 2.3% である。また、Case 1 から 4 までいずれも上水道料金の占める割合が最も大きかった。そこで、上水道料金変動した場合、2.4.5 で得られた結果はどのように変わるか、感度分析を行った。変数は上水道料金単価とし、現行料金に対して、-20%、20%、50% の増加したケースで評価した。その結果を図 2.4.22 に示す。

現行料金単価から -20% とした場合、総費用で最も安価となったのは Case 2 である。これは 4 ケースの中で上水道料金の占める割合が 95% ともっと大きいため、水道料金単価の値下げは全体費用を押し下げることとなった。一方、現行料金単価から 20% 及び 50% 増加した場合は、どれも Case 1 が最も安価という結果となった。

感度分析の結果、現行の上水道料金単価から -5% 以下では、Case 2 (399.6 百万 US\$) が Case 1 (401.0 百万 US\$) よりも安価となる。一方、単価が上昇する場合は、総費用の安い順から Case 1 < Case 2 < Case 4 < Case 3 となり、2.4.5 で得られた結果と変わらないという結論を得た。

なお、上水道単価の上昇する主な要因としては、上水道施設の改築更新や高度処理浄水の導入による給水サービス向上などが考えられる。よって、今後、上水道料金単価が上昇することは十分にあり得る。

これにより乾燥地域で水不足に直面している地域では、上水の代替として下水処理水を積極的に活用することが、経済的に有利であると言える。

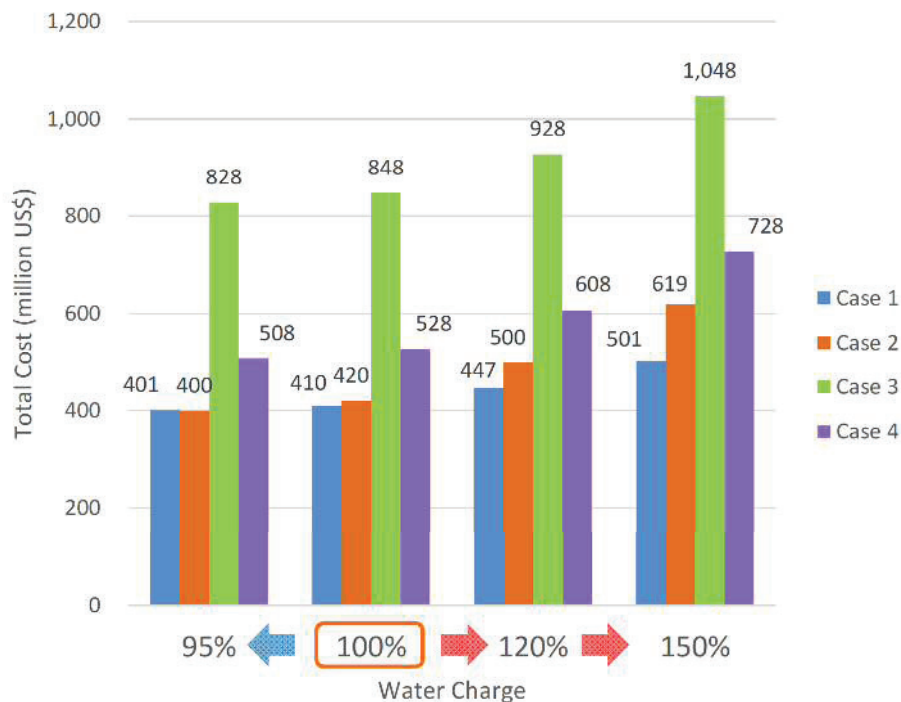


図2. 4. 22 上水道料金単価の感度分析

2. 4. 7 まとめ

本検討では、乾燥地域における下水処理水の活用もしくは処分システムの構築を目的として、下水処理水の処分、再利用について4ケースを設定し、費用面で評価を行った。その結果、下水処理水は再生水利用が最も安価となった。

下水処理水の再利用(Case 1)を、上水の代替として散水利用することで、下水処理水を処分、系外搬出よりも経済的に有利となった。また、下水処理水を系内で全て利用することで水循環のクローズド化が図られ、費用だけでなく、環境保護面からも優位といえる。

加えて、費用の占める割合が大きい水道料金の変動を想定し、感度分析を行った結果、水道料金単価の上昇では、全量再利用が最も経済的という結果は変わらなかった。よって、Case1が最適解であることがより実証された。

本検討では、地下水保全地域という特殊な条件下で検討を行ってきた。しかし、上水水源を海水淡水化に依存し、慢性的な水不足に見舞われている乾燥地域では、積極的に下水処理水を再利用することが費用面で効果があるといえる。

参考文献（第2章）

- 1) United States Environmental Protection Agency, Pacific Southwest, Region9, Water Reuse and Recycling: Community and Environmental Benefits,
<https://www3.epa.gov/region9/water/recycling/#enfbene>
- 2) 松尾ら, 水質環境工学 下水の処理・処分・再利用, 技報堂出版, p.833
- 3) 国土交通省下水道部, 我が国における下水処理水の再利用状況, <http://gcus.jp/wp/wp-content/uploads/2011/10/456b72c45a220a8393c33b0aefe9946f.pdf>
- 4) 国土交通省都市・地域整備局下水道部, 国土交通省国土技術政策総合研究所, 17年4月, 下水処理水の再利用水質基準等マニュアル, p.12
- 5) 国土技術政策総合研究所気候変動適応研究本部, 気候変動による渇水リスク増加に対応した下水処理水の活用方策に関する研究,
http://www.nilim.go.jp/lab/kikou-site/data/study_data/data4.pdf
- 6) 社団法人日本下水道協会, 下水道施設計画・設計指針と解説 後編 1994年版, p.189
- 7) Takashi Asano, Franklin L. Burton, Harold L. Leverenz, Ryujiro Tsuchihashi, George Tchobanoglous; Water Reuse, Metcalf & Eddy, p.109-111, 967
- 8) 真柄泰基, 赤澤寛, 橋本徳蔵, 森田亮吉, 大澤英治, 水道水質辞典, 日本水道新聞社, p.86, 89, 132, 228
- 9) United States Environmental Protection Agency, 2012 Guidelines for Water Reuse, p.3-3
- 10) 下水道膜処理技術会議, 下水道への膜処理技術導入のためのガイドライン [第2版], 平成23年3月, p.15
- 11) 農林水産省, サウジアラビアの農林水産業概況, 平成29年7月3日,
http://www.maff.go.jp/j/kokusai/kokusei/kaigai_nogyo/k_gaikyo/attach/pdf/sau-3.pdf
- 12) 農林水産省, アラブ首長国連邦の農林水産業概況, 平成29年11月6日,
http://www.maff.go.jp/j/kokusai/kokusei/kaigai_nogyo/attach/pdf/180222-2.pdf
- 13) Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Food and agriculture data, www.fao.org/faostate/en/#home
- 14) Takashi Asano, Franklin L. Burton, Harold L. Leverenz, Ryujiro Tsuchihashi, George Tchobanoglous: Water Reuse, Metcalf & Eddy, p. 972-973
- 15) 下水道計画研究会, 財団法人全国建設研修センター, 下水道計画の手引き 平成14年版, p.45
- 16) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部, 下水道事業における費用効果分析マニュアル, 平成28年12月, p.17
- 17) 厚生労働省健康局水道課, 水道事業の費用対効果分析マニュアル, 平成23年7月, p.5
- 18) 公益社団法人日本下水道協会, 都道府県別の下水処理人口普及率,
<http://www.jswa.jp/sewage/qa/rate/>
- 19) 国土交通省, 下水道分野の国際展開に関する現状分析と課題, 資料2-1,
<http://www.mlit.go.jp/common/001037533.pdf>

- 20) Abdel-Rahman, Hayder A., & Mohammed Abdel-Magid, Isam: Water conservation in Oman. *Water International Journal*, 18, pp.95-102, 1993.
- 21) Aleisa, Esra, & Al-Zubari, Waleed: Wastewater reuse in the countries of the Gulf Cooperation Council (GCC): The lost opportunity. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189,553, 2017.
- 22) Ahmed Osman Ibnouf, Mohamed, & Mohammed Abdel-Magid, Isam: Oman water resources: Management, problems and policy alternatives. The second Gulf water conference, Bahrai, Water in the Gulf region toward integrated management, Water Sciences and Technology Association, Manama, Conference Proceedings vol.1, pp.19-31, 1994.
- 23) Al Khamisi, Saif A., Prathapar, S. A., & Ahmed, M: Conjunctive use of reclaimed water and groundwater in crop rotations. *Agricultural Water Management*, 116, pp.228-234, 2013.
- 24) Jamrah, Ahmad, Al-Futaisi, Ahmed, Rajmohan, Natarajan, & Al-Yaroubi, Saif: Assessment of groundwater vulnerability in the coastal region of Oman using DRASTIC index method in GIS environment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 147, pp.125-138, 2007.
- 25) Zekri, Slim: Using economic incentives and regulations to reduce seawater intrusion in the Batinah costal area of Oman. *Agricultural Water Management*, 95, pp.243-252, 2008.
- 26) Shamma, Mahaad I.: The effectiveness of artificial recharge in combating seawater intrusion in Salalah coastal aquifer. *Oman, Environmental Geology*, 55, pp.191-204, 2008.
- 27) Baawain, Mahad S., Al-Omairi, Abdulrahim, & Choudri, B. C.: Characterization of domestic wastewater treatment in Oman from three different regions and current implications of treated effluents. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186, pp.2701-2716, 2014.
- 28) Asano, Takashi, & Cotruvo, Joseph A.: Groundwater recharge with reclaimed municipal wastewater: Health and regulatory considerations. *Water Research*, 38, pp.1941-1951, 2004.
- 29) Prathapar, S. A., Jamrah, A., Ahmed, M., Al Adawi, S., Al Sidairi, S., & Al Harassi, A.: Overcoming constraints in treated greywater reuse in Oman. *Desalination*, 186, pp.177-186, 2005.
- 30) Muhammad F. Al-Rashed, & Mohsen M. Sherif.: Water Resources in the GCC Countries: An Overview, *Water Resources Management* 14, pp59-75, 2000.
- 31) Jamrah, Ahmad, Al-Futaisi, Ahmed, Prathapar, Sanmugan, & Al Harrasi, Ali: Evaluating grey water reuse potential for sustainable water resources management in Oman. *Environmental Monitoring and Assessment*, 137, pp.315-327, 2008.
- 32) Al-Ismaili, Abdulrahim M., Ahmed, Mushtaque, Al-Busaidi, Ahmed, Al-Adawi, Seif, Tandlich, Roman, & Al-Amri, Mohammed: Extended use of grey water for irrigation home gardens in an arid environment. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, pp.13650-13658, 2017.
- 33) Al-Bahry, S. N., Mahmoud, I. Y., Al-Belushi, K. I. A., Elshafie, A. E., Al-Harthy, A., & Bakheit, C. K: Costal sewage discharge and its impact on fish with reference to antibiotic resistant enteric bacteria and enteric pathogens as bio-indicators of pollution. *Chemosphere*, 77, pp.1534-1539, 2009.
- 34) Weyhenmeyer, Constanze E., Burns, Stephen J., & Waber, H. Niklaus: Isotope study of moisture sources, recharge area, and groundwater flow paths within the eastern Batinah coastal plain, Sultanate of Oman. *Water Resources Research*, 38, pp.1184, 2002.
- 35) Gibb, A., & Sir, Partners: Water resources survey of northern Oman. Report, Ministry of Water Resource, Muscat, Oman, 1976.
- 36) Stanger, G.: The hydrogeology of the Oman mountains. Ph.D. thesis, Open University, Milton Keynes, UK, 1986.
- 37) Lakey, R., Easton, P., & Al Hinai, H. : Eastern Batinah resource assessment. Numerical modeling. Report, Ministry of Water Resource, Muscat, Oman, 1995.

- 38) Entec Europe Limited. 1998. Consultancy services for the study of development activities on groundwater quality of Wadi Adai, Al Khawd and Salalah Wellfield Protection Zones, Contract No96-2133, Final Report, Ministry of Water Resources, Sultanate of Oman.
- 39) Satoru Oniki: Planning of treated effluent distribution system for Muscat, Oman, the 61st Annual Conference of Japan Water Works Association, pp614-615, 2010.
- 40) Satoru Oniki: Measures for potential risks in treated effluent distribution system in Muscat, Oman, the 62nd Annual Conference of Japan Water Works Association, pp704-705, 2011.
- 41) Satoru Oniki, Toru Miyao, & Yoshihiko Hosoi: Planning of wastewater reuse and disposal system in an arid region, the 50th Environmental Engineering Research Forum of Japan Society of Civil Engineers, N-5, 13, 2013.
- 42) Prathapar, S. A., Ahmed, M., Al Adawi, S., & Al Sidiari, S.: Design, construction and evaluation of an ablution water treatment unit in Oman: A case study. *International Journal of Environmental Studies*, 63, pp.283-292, 2006.
- 43) Japan Cooperation Centre for Middle East, Industrial Infrastructure in Oman, <https://www.jccme.or.jp/08/pdf/08-07-09.pdf>.

第3章 再生水利用を考慮した下水処理施設の立地計画

3.1 はじめに

水不足に直面している地域では、下水の再利用は、新たな水源確保といえる。第2章2.4で、乾燥地域において再生水システムの導入の可能性に関する予備的検討を行った。その結果、下水処理水を再生水として、積極的に利用することが経済的に優位であることが実証された。

一般に、下水処理場は、汚水を集水しやすい低地で放流先を確保できる場所に建設される。しかし、下水の再利用を考えた場合、費用面から必ずしも低地が最適な建設用地とはいえない。本章では、処理水再利用の観点から、下水処理場の立地計画を支援する数理最適モデルを検討する。そこで二次処理施設及び高度処理施設の最適な立地計画は、従来の低地に建設する計画とは異なることを確認する。

開発途上国や未開発地域では、下水道の整備は進んでいないのが現状である。しかし、そのような地域では人口が増加しており、環境保全・水源保全の観点から下水道整備の必要性も高まっている。そこで下水道整備を行うに当たり、当初から下水処理水の再利用を考慮した下水道システムを検討することができる。そこで、下水処理のための二次処理施設と下水処理水再利用のための高度処理施設を同時に計画する支援方法を提案する。

本章では、水ストレスが高い発展途上国または未開発地域を想定し、下水道未整備の地域において最適な下水処理施設の配置計画の支援モデルを構築する。特に数理最適モデルは、最適な施設配置計画を策定することに寄与することを実証する。

3.2 本研究の考え方

3.2.1 実際の下水処理における段階的処理

本研究において、以下に取り扱う3種類の下水をここに定義する。下水とは主に家庭、商業及び工業施設から排水される生下水のことで未処理の状態をいう。下水処理水は生下水を二次処理したもので、この段階では再生水利用には適していない。再生水は三次処理（高度処理）後のこと指し、下水処理水を再利用できる状態である。なお、二次処理は、微生物反応を利用して生物学的に有機性物質の除去を行うものであり、高度処理は、一次処理及び二次処理では十分に除去出来ない有機物、窒素、りんなどのより高度な除去を行う方法である¹⁾。

高度処理後の処理水は、再生水として利用することができる水準の水質が得られる。一般的には、二次処理後に下水処理水は放流するが、再利用目的でより高度な水質レベルを得るために二次処理の後段に高度処理を行うこととする。

そこで、本研究では、ある地域内に二次処理と高度処理の二種類の処理施設の建設を計画し、地域で発生した下水は全て二次処理施設で処理する、すなわち未処理放流しないことを

前提条件の一つとする。その後、二次処理水は高度処理施設へ送水され、水需要に応じて配水する計画とする。

3.2.2 既往研究と本研究の枠組み

最適な配水システムの計画・設計という観点から、これまで多くの研究がなされてきており、下水処理水の再利用に触れているものもある²⁾。Pingry と Shaftel は、最適な配水システムを求めるため、必要水量と水質を制約とする非線形計画モデルを構築した³⁾。このような数理最適化モデルは、計画段階における意思決定や、コンフリクトの解消を支援するのに有効と言える。

近年、工業地域において下水処理水の再利用を目的として、再生水利用のための数理計画によるアプローチがなされるようになってきた^{4),5),6),7)}。

しかし、こうした枠組みの多くにおいて、下水の再利用を考慮した施設配置の検討はされてこなかった。これは開発地域において、上水道配水施設と下水処理施設は既に整備されているところが多いことから、再生水利用を導入する段階では、二次処理施設の立地は既設であることから問題とならない。一方で、発展途上国やインフラが未整備の地域では、下水道施設も未整備であることが多いことから、当初から二次処理施設と高度処理施設の立地を同時に決定する計画の場面に直面している。

それゆえ本章では、乾燥地域において近い将来、新規で下水処理施設が建設されることを想定し、施設立地に関する支援モデルを提案する。この問題は、費用面で最適となる下水処理施設の位置選定と同時に、対象となる地区間で汚水・処理水が移動（送水）するという問題を数理最適問題として扱うものとする。

3.2.3 下水処理施設の立地場所

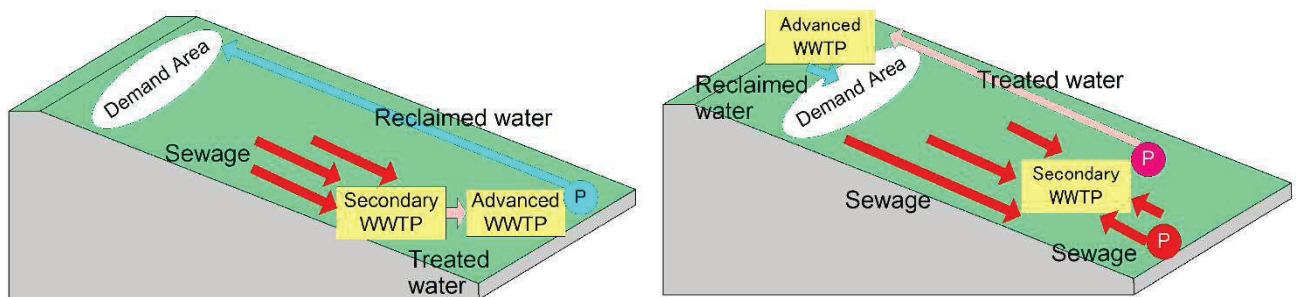
下水道施設は、膨大な建設費が必要なだけでなく、一度供用開始すると永続的に稼働するため、運転維持管理を低減させることは命題である。特に下水の収集では、できるだけポンプなどの動力を使わず、集水することが重要で、それには重力を利用した自然流下方式が採用される。よって下水処理場は、下水処理区域に隣接しかつ最下流域や低地に建設することが一般的である。

しかし、下水処理場からの処理水を再利用することを計画当初から考慮すると、必ずしも低地が最適な立地場所とはいえない。それは再生水を水需要が見込まれる場所に供給するため、下水処理場から水需要地へ送水することにより、下水処理場の位置が高地もしくは低地によって、ポンプによる送水もしくは自然流下による配水となるため、再生水の送水費用は変動するからである。

再生水を水需要地へ配水する計画を考えた場合、図 3.2.1 に二次処理施設と高度処理施設の位置関係を示す。(a)は下水排除を優先とした一般的な処理場位置を示す。これは最初に二次処理施設を建設し、後段に高度処理施設を建設し処理水を配水する計画である。発生した下水は自然流下で集水し、二次処理施設へ送られる。二次処理水は再利用のため高度処理施設に送水され、処理後に再生水として水需要地へ送水する。水需要地が二次処理施設よりも高

地ある場合は、ポンプ（動力）を用いて再生水を送水することになる。下水排除計画後に再生水利用計画を立案すると、下水を自然流下で集水したメリットを、動力を用いて再生水を配水するというデメリットで相殺することとなり、結果、集水と配水でエネルギーロスが生じる可能性がある。

一方、(b)は下水排除と再生水利用を同時に立案した計画例である。その場合、高度処理施設は二次処理施設の後段となるものの、必ずしも同じ区域（敷地）に建設することを制約とせず、異なる区域で別の場所に立地することを妨げない。下水の収集には自然流下方式を優先せず、換言すれば二次処理施設は必ずしも低地に位置する必要はなく、ポンプによる揚水がオプションとして与えられる。そして水需要の大きい高地付近に高度処理施設を建設したほうが再生水配水のために経済的であるという考えである。



(a) 一般的な二次処理と高度処理施設の配置

(b) 水需要に応じた配置

図 3.2.1 二次処理施設と高度処理施設の位置関係

3.3 下水処理施設整備に係る数理最適化モデルの構築

3.3.1 本研究における前提条件と考え方

本章では、複数の地区からなる仮想的な地域を考え、地区ごとの下水発生量と再生水需要量を設定した上で、処理施設の建設・運転維持管理費用と地区間の再生水送水費用を含めた総費用を最小化する下水処理場の建設場所を、以下の前提条件のもとで検討する。

本研究で扱う水の種類とその流れを図 3.3.1 に示す。紺色の矢印は下水の流れを表しており、同図の例では、地区 n の住人による水資源の利用で v_n の量の下水が発生し、これが地区 i に立地する二次処理施設へ送水されることを意味する。一般に、下水発生地区 n から地区 i の二次処理施設までの下水送水量を $w_{n,i}$ のように表す。すべての下水は二次処理を施す必要があるものとする。次に、黄色の矢印は二次処理水の流れを表しており、二次処理水を高度処理施設へ送って高度処理を施すことで、再生水として利用可能な水準の水質になるものとする。図 3.3.1 では、地区 i の二次処理施設で処理された下水が地区 j に立地する高度処理施設へ送水されることを意味する。ただし、再生水の需要が十分でない場合には、高度処理の必要がない二次処理水は高度処理施設へは送水されず、余剰水として系外に放流され、再利用されない。一般に、二次処理地区 i から地区 j の高度処理施設までの二次処理水送水量を $y_{i,j}$ のように表す。系外を意味する地区ラベルは便宜的に $i=0$ を用いる。最後に、水色の矢印は再生水の流れを表しており、同図の例では、地区 1 に d_1 だけの再生水需要があり、地区 j の高度処理施設から再生水が供給されることを意味する。一般に、高度処理地区 j から地区 1 への再生水送水量を $z_{j,1}$ のように表す。

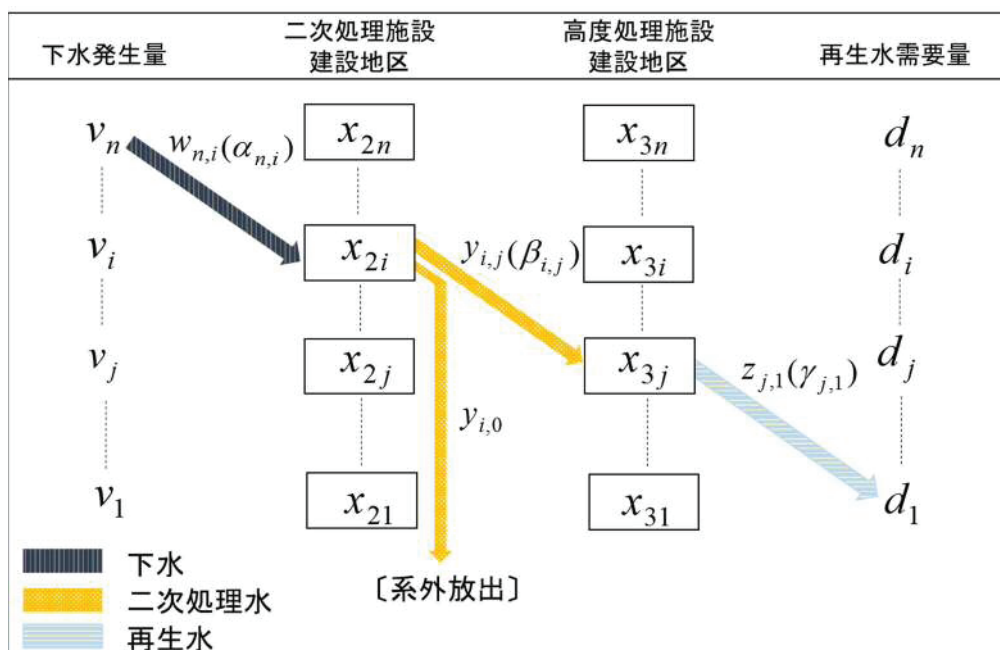


図 3.3.1 本研究における 3 種類の下水のフロー

3.3.2 二次処理過程における費用関数と制約条件

先述の前提のもと、まず各地区から発生した下水を二次処理施設で処理するまでの過程について考える。具体的には、二次処理施設の建設・運転維持管理費と下水発生地区から二次処理施設まで下水を集水する費用の合計をこの過程で考慮する全体の費用とし、それを最小化する建設地区と下水の回収経路を求める問題として定式化する。下水を二次処理するための施設を地区 j に建設・運転維持管理の費用を次のように表す。地区 j に二次処理施設を建設しない場合は、 $x_{2j} = 0$ をとり、建設する場合は $x_{2j} = 1$ となる。

$$\sum_{j=1}^n c_{2j} x_{2j} \quad (3.1)$$

$$s.t. \quad x_{2j} = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}$$

c_{2j} : 地区 j の二次処理施設建設及び運転維持管理費用係数

x_{2j} : 地区 j の二次処理施設の建設地区 (バイナリ変数)

各地区で発生する下水は、その全量を放流水域の水質の許容限度内とするために二次処理施設へ送水する。各地区から二次処理施設への送水費用は次のように表せる。

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_{i,j} w_{i,j} \quad (3.2)$$

$\alpha_{i,j}$: 地区 i から地区 j への下水送水費用係数

$w_{i,j}$: 地区 i から地区 j への下水送水量

したがって、(3.1)、(3.2)で表せる費用の和が二次処理過程における総費用 C_2 となり、以下の式が成立する。

$$C_2 = \sum_{j=1}^n c_{2j} x_{2j} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_{i,j} w_{i,j} \quad (3.3)$$

式(3.3)が二次処理過程に係る費用関数であり、本研究で構築する数理計画問題において目的関数の一部となる。続いて、ここまでの過程の制約条件を考える。第一に、二次処理施設で下水を処理するためには、下水が発生した地区から施設がある地区まで下水が送水される。その一方で、二次処理施設がない地区への送水量は必ずゼロである。換言すれば発生下水はすべて二次処理施設へ送水される。これを十分大きな数である M を用いて次の関係式により表現できる。

$$0 \leq w_{i,j} \leq Mx_{2j} \quad (3.4)$$

第 2 の制約条件として、各地区で発生した下水は全て二次処理施設に送水し処理する。これは未処理放流を禁止するという前提に基づいている。このことから、発生量と送水量の間には式(3.5)のような物量保存の関係式が成立する。

$$\sum_{j=1}^n w_{i,j} = v_i \quad (3.5)$$

以上のことから、二次処理の過程に係る費用とその制約条件が求められる。

3.3.3 高度処理過程における費用関数と制約条件

次に、二次処理施設での処理水を高度処理施設に送り、そこで高度処理により再利用に適した水質水準まで処理し、その後、各地区の再生水需要量を満たすように送水するまでの過程の定式化を考える。

前節における二次処理施設と同様に、高度処理施設を地区 k に建設する場合は次のように表される。地区 k に高度処理施設を建設しない場合は、 $x_{3k}=0$ をとり、建設する場合は $x_{3k}=1$ となる。

$$\sum_{k=1}^n c_{3k} x_{3k} \quad (3.6)$$

$$s.t. \quad x_{3k} = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}$$

c_{3k} : 地区 k の高度処理施設の建設・運転維持管理費用係数

x_{3k} : 地区 k の高度処理施設の建設地区 (バイナリ変数)

二次処理水の送水費用は、式(3.7)のように記述できる。ここに、一部 ($k=1, 2, \dots, n$) は高度処理施設への送水を表し、一部 ($k=0$) は、二次処理水を余剰水として系外 (海や河川) に放流することを意味している。

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=0}^n \beta_{j,k} y_{j,k} \quad (3.7)$$

$\beta_{j,k}$: 地区 j から地区 k への二次処理水送水費用係数

$y_{j,k}$: 地区 j から地区 k への二次処理水送水量

また、再生水を各需要地区へ送水する費用は次式のように表せる。

$$\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \gamma_{k,l} z_{k,l} \quad (3.8)$$

$\gamma_{k,l}$: 地区 k から地区 l への再生水送水費用係数

$z_{k,l}$: 地区 k から地区 l への再生水送水量

よって、(3.6), (3.7), (3.8)で表した式の和が高度処理施設における総費用 C_3 となり、以下の式が成立する。

$$C_3 = \sum_{k=1}^n c_{3k} x_{3k} + \sum_{j=1}^n \sum_{k=0}^n \beta_{j,k} y_{j,k} + \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \gamma_{k,l} z_{k,l} \quad (3.9)$$

続いて、高度処理過程における制約条件を考える。まず、二次処理水を再生水として利用するには、高度処理施設に送水し処理する必要がある。高度処理施設がある地区には、水需要量に対して十分な二次処理水が送水されるが、高度処理施設がない地区には送水されない。このことを、前節と同様に十分大きな数 M を用いて次のような関係式で表現する。

$$0 \leq y_{j,k} \leq Mx_{3k} \quad (3.10)$$

第 2 の制約条件として、二次処理過程の前後における物量保存の関係式が成立する。すなわち、二次処理施設に送られてくる下水の量と、二次処理後に出ていく二次処理水の量が等しくなければならない。二次処理水の量は、高度処理施設へ送水される量と、海や河川に放流する量の和であるから、この制約は次式のように表せる。

$$\sum_{i=1}^n w_{i,j} = \sum_{k=0}^n y_{j,k} \quad (3.11)$$

第 3 の制約条件は、高度処理過程の前後における物量保存の関係式である。すなわち、高度処理施設に送水された二次処理水と高度処理施設から送水される再生水の量は等しいということである。この制約は次式のように表せる。

$$\sum_{j=1}^n y_{j,k} = \sum_{l=1}^n z_{k,l} \quad (3.12)$$

第 4 の制約条件は，再生水が各地区の需要を満たすように供給されることである．高度処理施設が複数存在する場合でも，複数の施設から送水される再生水の総量が，それぞれの地区ごとの水需要量を満たさなければいけない．これは，式(3.13)のように表せる．

$$d_l \leq \sum_{k=1}^n z_{k,l} \quad (3.13)$$

以上が，高度処理施設を建設・運転維持管理し，二次処理水を再生水とし，各需要地に送水する際の費用と制約条件である．

3.3.4 下水処理施設の数理最適化モデルの定式化

前節まででは，下水処理過程の費用及び制約条件を二次処理過程及び高度処理過程・再生水の送水に分けて検討した．これら全体の総費用 C を用いて，費用最小化問題として表したものが本研究で扱う数理計画問題となる．数理計画問題として定式化したものを改めて次頁に記す．この数理計画問題は，変数が 0-1 整数値を取る制約が x_{2j} と x_{3k} に付いており，整数値を取る変数と実数値を取る変数が混在する線形計画問題であるため，混合整数線形計画問題 (Mixed-integer Linear Programming, MILP) と呼ばれる⁸⁾．MILP をインフラ計画に適用した研究事例として，荒井ら^{9), 10)} は，MILP を用いて大規模送配水システムの電力最小化問題を定式化・分析している．

この問題を解くことにより，二次処理施設と高度処理施設の最適な建設地区及び下水，二次処理水，再生水の最適な配分量が明らかになる．

目的関数

$$\min C = C_2 + C_3$$

$$= \sum_{j=1}^n c_{2j} x_{2j} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_{i,j} w_{i,j} \quad (3.3)$$

$$+ \sum_{k=1}^n c_{3k} x_{3k} + \sum_{j=1}^n \sum_{k=0}^n \beta_{j,k} y_{j,k} + \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \gamma_{k,l} z_{k,l} \quad (3.9)$$

制約条件

$$0 \leq w_{i,j} \leq Mx_{2j} \quad (3.4)$$

$$\sum_{j=1}^n w_{i,j} = v_i \quad (3.5)$$

$$0 \leq y_{j,k} \leq Mx_{3k} \quad (3.10)$$

$$\sum_{i=1}^n w_{i,j} = \sum_{k=0}^n y_{j,k} \quad (3.11)$$

$$\sum_{j=1}^n y_{j,k} = \sum_{l=1}^n z_{k,l} \quad (3.12)$$

$$d_l \leq \sum_{k=1}^n z_{k,l} \quad (3.13)$$

3.4 数値計算

3.4.1 条件設定

(1) 各地区の発生下水量

モデル地区を図 3.4.1 に示すように設定した。モデル地区を 5 つの地区に分け、地区 1 から地区 5 までそれぞれの発生下水量を 90, 120, 150, 90, 60 とした。また地区 1 と 3 には再生水需要量が 50 あると設定した。

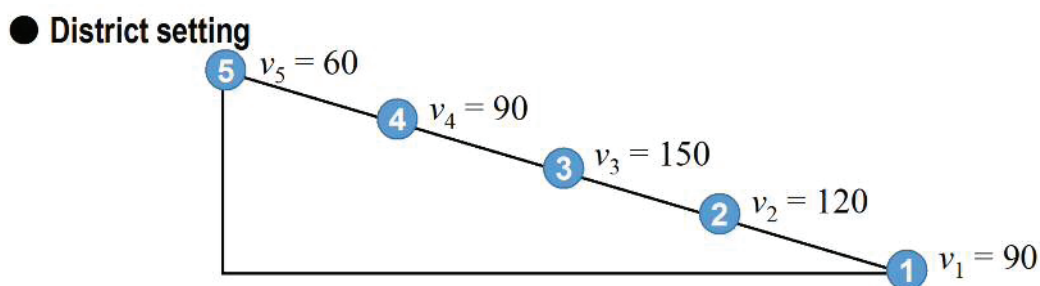


図 3.4.1 各地区における発生下水量

(2) 送水費用係数

次に各地区から次の地区へ送水する費用係数を表 3.4.1 に示す。例えば、地区 5 から地区 1 へ送水する場合、自然流下による送水により費用係数は 0.25 と比較的小さい値をとる。一方、地区 1 から地区 5 へ送水する場合、ポンプによる揚水を必要とすることから費用が嵩み、最も高い値 8 をとることになる。これは揚程差が大きいほど大きな値をとり、自然流下による動力を必要としない送水ほど小さな値をとることを反映したものである。

表 3.4.1 地区間の送水費用係数

Districts From/to	5	4	3	2	1	0
5	0.1	0.1	0.15	0.2	0.25	0.025
4	2	0.1	0.1	0.15	0.2	0.02
3	4	2	0.1	0.1	0.15	0.015
2	6	4	2	0.1	0.1	0.01
1	8	6	4	2	0.1	0.005

(3) 下水処理場建設・運転維持管理費用係数

下水処理場の費用係数には建設及び運転維持管理に係る費用が含まれている。費用係数は、表 3.4.2 のとおり設定した。二次処理施設及び高度処理施設の費用係数の関係は、本検討では仮の値として与えており、後述の検討において費用の変動がどのように最適な施設配置に影響を与えるか、その挙動を確認するのが目的である。そのため、費用係数そのものの正確性

については本検討では論じない。

表 3.4.2 下水処理場建設・運転維持管理費用係数

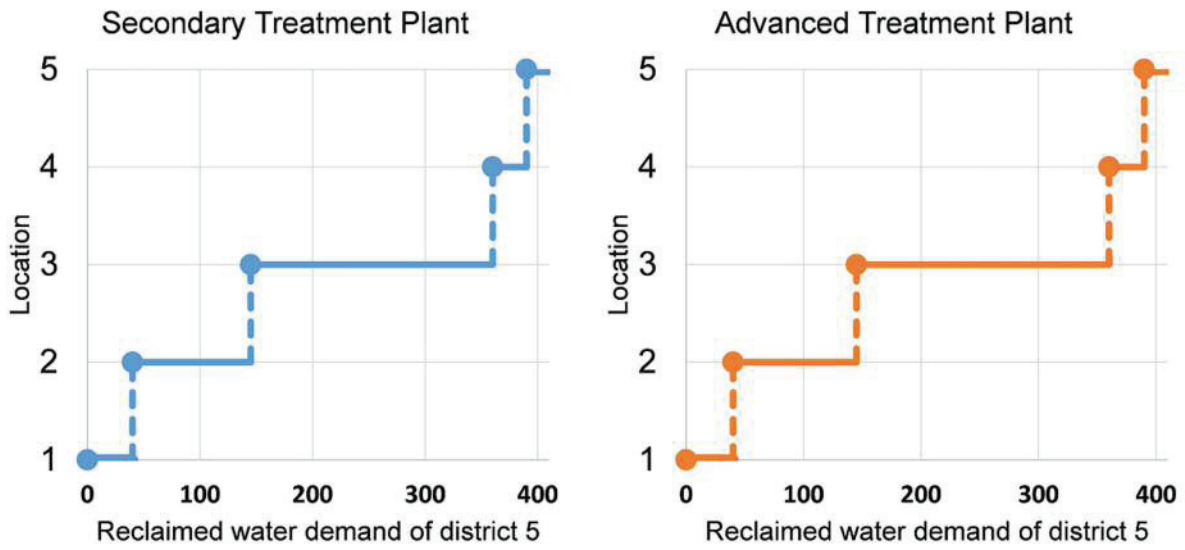
Secondary treatment plant	1,000
Advanced treatment plant	1,800

3.4.2 再生水需要に伴う下水処理施設の最適立地場所の変化（ケース 1）

モデル地区の最も高台にある地区 5 を取り上げ、再生水の需要量を 0 から 400 まで 10 毎に変化させ、二次処理施設及び高度処理施設の最適な立地場所を計算した。その結果を図 3.4.2 に示す。また、下水、二次処理水及び再生水の移送とその量を図 3.4.3 に示す。

地区 5 では、再生水の需要が大きくなるにしたがって二次処理施設の立地が高台へとシフトしていく。モデル地区の発生水量は計 510 であり、地区 1 及び 3 に水需要量 50 を与えたことから、地区 5 への供給量は最大 410 となる。そのうえで、需要量 400 付近では最も高台となる地区 5 で二次処理施設立地が最適解となった。同時に高度処理施設の建設位置も二次処理施設と同じ位置を示しており、同じ挙動をとっている。

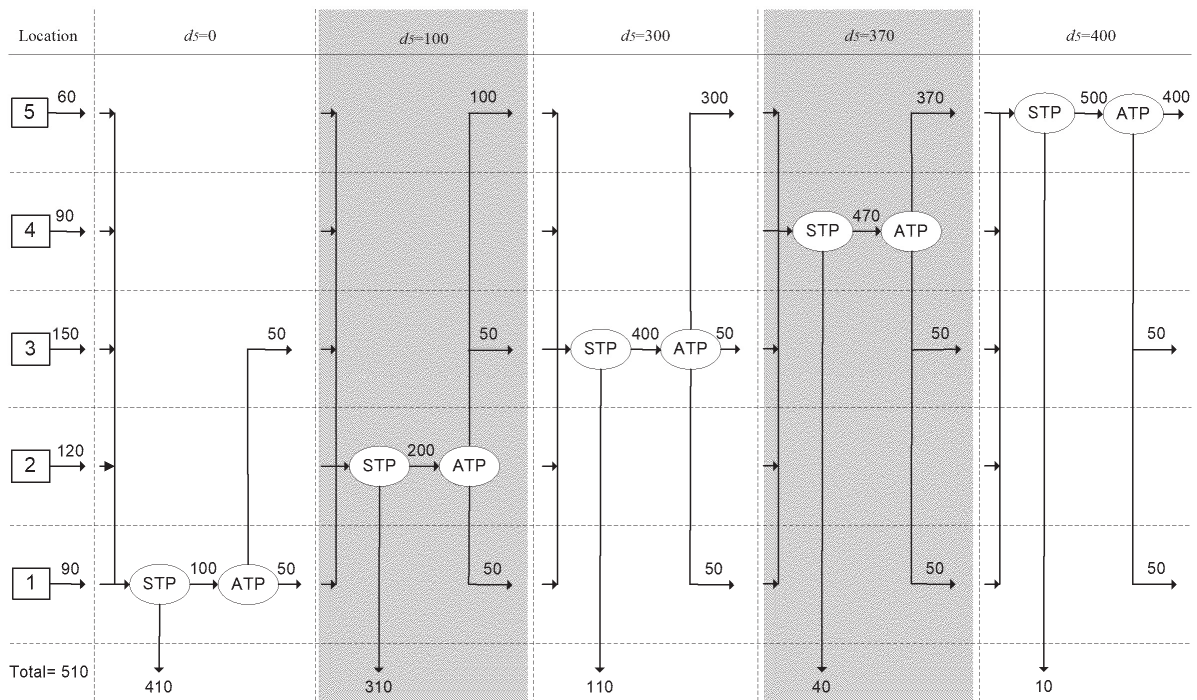
これは高台の再生水の需要が大きくなるほど、下水を収集する費用よりも二次処理水及び再生水の送水費用が安価となることを意味し、地区 5 の水需要が高まるにつれ、二次・高度処理場位置が上方へシフトする。従来、計画されてきた二次処理施設先行の下水道計画と異なり、再生水利用計画を併用した場合、二次処理施設の低地での建設が必ずしも最適解とはならないことを実証した¹¹⁾。



(a) 二次処理施設の立地

(b) 高度処理施設の立地

図 3.4.2 地区 5 における再生水需要変動に伴う最適立地計画



d_5 : Water demand of district 5, STP: Sewage Treatment Plant, ATP: Advanced Treatment Plant

図 3.4.3 下水・二次処理水・再生水の移送 (ケース 1)

次に下水処理場の建設・運転維持管理費用を半分にした場合を検討する。

3.4.3 再生水需要に伴う下水処理施設の最適立地場所の変化 -建設・運転維持管理費用係数半減- (ケース2)

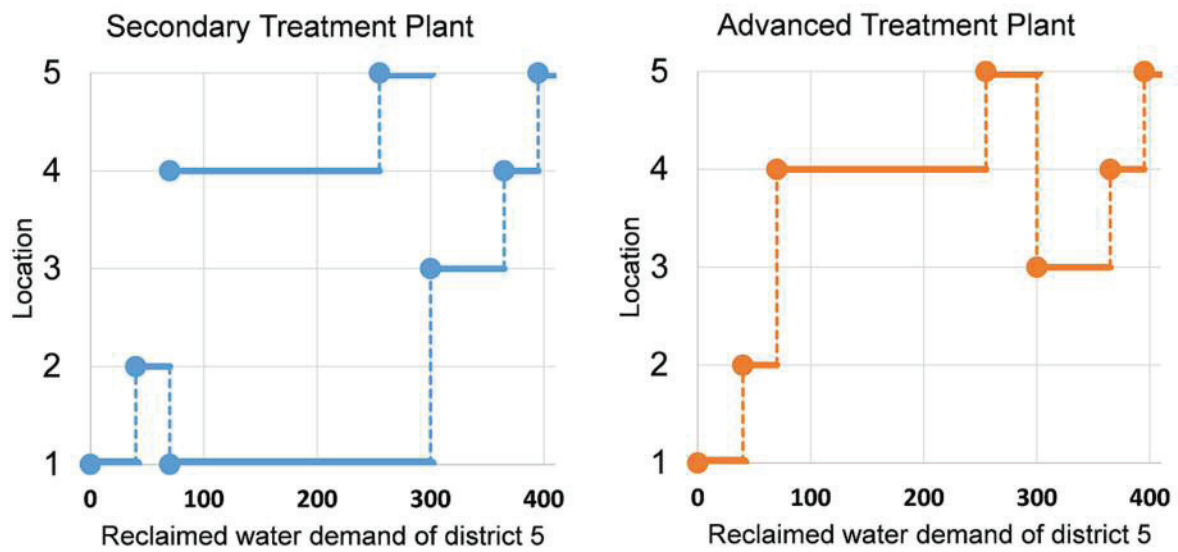
このケースは下水処理場の建設・運転維持管理費用を半分にすることで、1箇所の集約処理から分散型処理へ移行するのかが、移行すれば何箇所となるか、施設立地の最適解の挙動を検証する。二次処理施設の費用係数は1,000から500へ、高度処理施設の費用係数は1,800から900へと半分とした。その計算結果を図3.4.4に示す。また、下水、二次処理水及び再生水の移送とその量を図3.4.5に示す。

このケースでは、地区5の需要量が80から300までの値をとるとき、二次処理施設が地区1と地区4もしくは地区5の2箇所に建設することが最適との解を得た。さらに地区5の需要量が300を超えると再び二次処理施設は地区3にシフトし1箇所の集約処理が最適となった。一方で、高度処理施設は地区5の水需要量に応じて高台にシフトするが、300を超えると二次処理施設と同じ場所に建設することが最適解となった。

二次処理施設が2箇所に建設されるのは、建設・運転維持管理費用が軽減された上に、水需要量増加に応じて必要な二次処理施設能力だけが地区4または地区5に建設される。一方、水需要が比較的低い300までは、二次処理水は余剰水として系外へ放流することとなり、低地である地区1に別途、建設することが最適解となる。需要量が300を超えると、水需要のある地区1, 3, 5に配水するためかつ施設費用のスケールメリットが生じたと考えられ、1箇所に立地することが最適解となった。

一方、高度処理施設は水需要の規模に応じて建設されるため、水需要80-300では需要が比較的大きい地区5付近である地区4または地区5に立地する。しかし、300を超えてから地区5の水需要が増加(300-370程度)したにもかかわらず、地区3に立地となったのは、送水費用のウエイトが高くなったためである。これは水需要地のある地区1, 3, 5へ再生水を配水するには、高台(地区5)に揚水してから高度処理を行って配水するよりも、中間位置に当たる地区3での高度処理から配水が、配水に係る費用を押さえることができるためと考えられる。

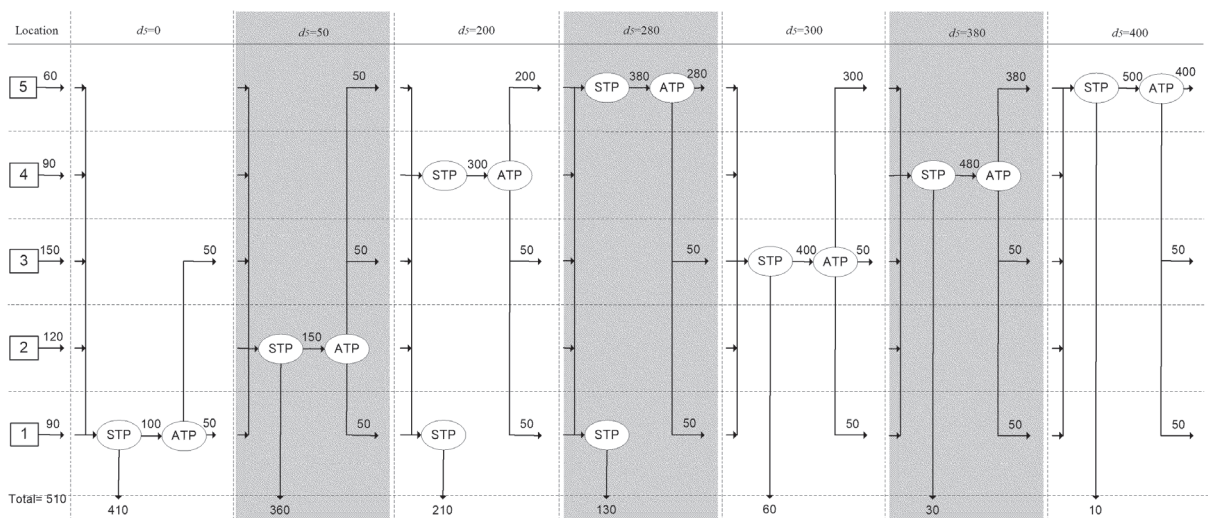
この結果から、下水処理場建設・維持管理費用の負担が減ることにより、相対的に送水費用の割合が増加することで、ある需要量においては、下水処理施設を複数箇所建設することが、最適となることを実証した。



(a) 二次処理施設の立地

(b) 高度処理施設の立地

図 3.4.4 地区 5 における再生水需要変動に伴う最適立地計画（費用半減）



d_s : Water demand of district 5, STP: Sewage Treatment Plant, ATP: Advanced Treatment Plant

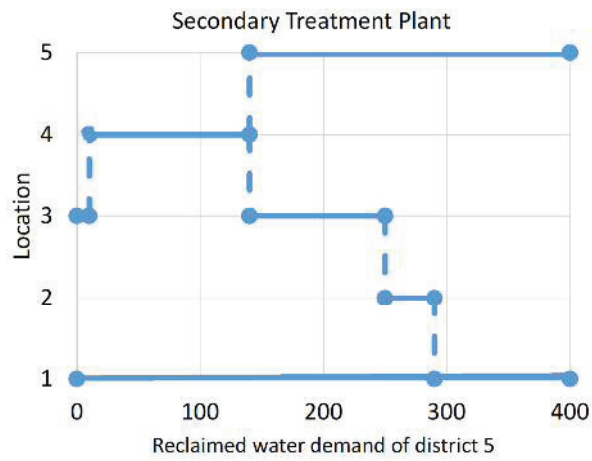
図 3.4.5 下水・二次処理水・再生水の移送（ケース 2）

3.4.4 再生水需要に伴う下水処理施設の最適立地場所の変化 -建設・運転維持管理費用係数 1/10- (ケース3)

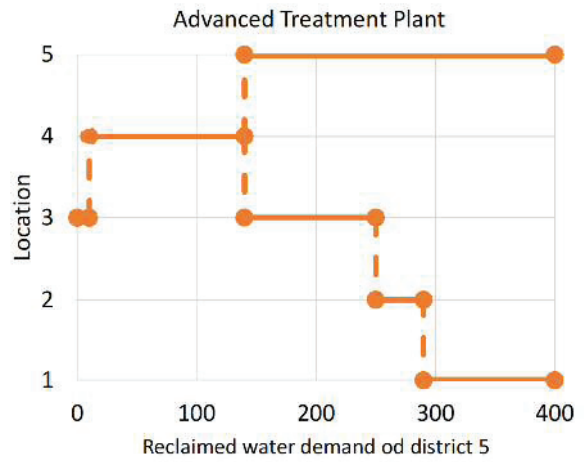
本ケースは、ケース2の建設・運転維持管理費用1/2に倣い、下水処理場の建設／運転維持管理費用を1/10にすることで、1~2箇所の集約処理から分散型処理へどのように移行するか、立地の最適解の挙動を検証する。ここで、二次処理施設の費用係数は1,000から100へ、高度処理施設の費用係数は1,800から180へと1/10とした。その計算結果を図3.4.6に示す。また、下水、二次処理水及び再生水の移送とその量を図3.4.7に示す。

本ケースは、下水処理施設の建設・運転維持管理費用を大きく低減した場合、つまり送水費用を相対的に増加した場合、処理場の最適な立地の挙動を検証した。二次処理施設が3箇所(地区1,3,5)に建設されるパターンは、水需要が比較的低い140-290までは、水需要量に応じて必要な二次処理施設能力分だけが地区3及び地区5に建設され、余剰となった二次処理水は系外へ放流することから、低地である地区1に建設することが最適解となる。高度処理施設も水需要の規模に応じて建設されるため、水需要の高い地区に近い場所に建設される。

この結果、処理水送水費に対して処理場建設費の比率を極端(1/10)に下げた場合、複数箇所(二次処理施設では3箇所、高度処理施設は2箇所)の下水処理施設建設を最適と示している。二次処理施設は集約処理から個別処理へ移行し、高度処理施設は水需要が高い地区へそれぞれ立地する傾向を示す。実際には下水処理場建設・運転維持管理費用が1/10まで圧縮されることはなく、公共事業として集約処理する事業ではなくなる。

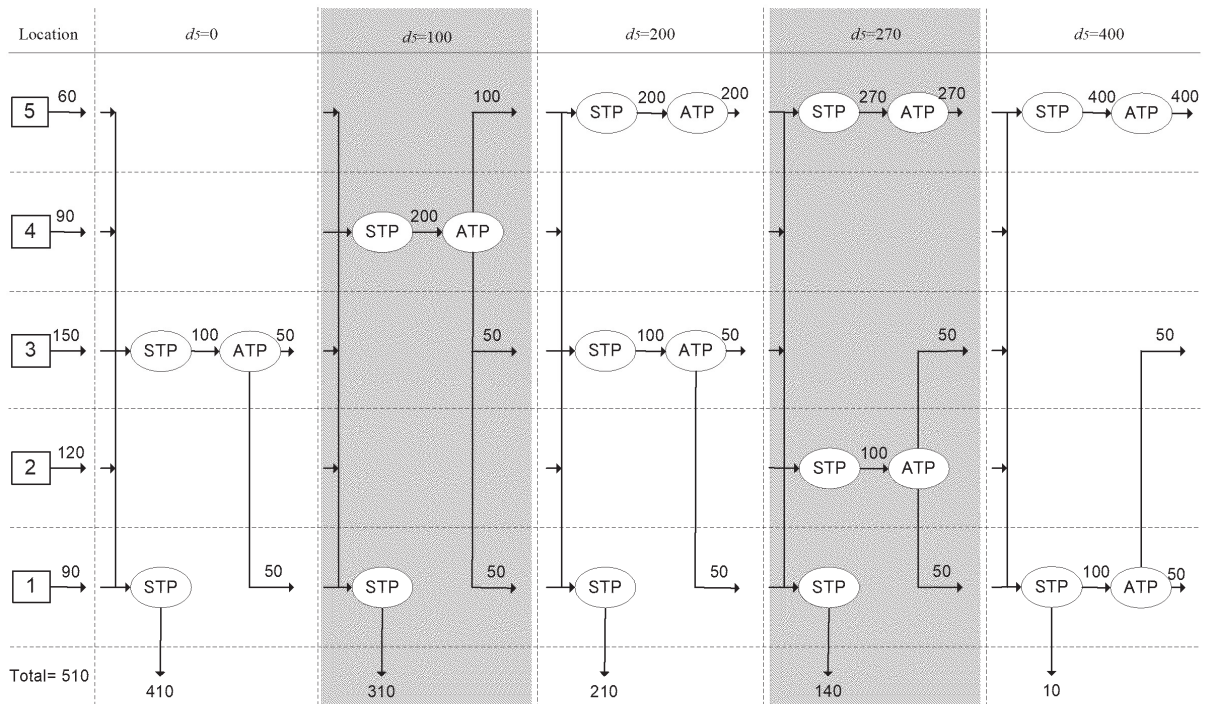


(a) 二次処理施設の立地



(b) 高度処理施設の立地

図 3.4.6 地区 5 における再生水需要変動に伴う最適立地計画（費用 1/10）



d_5 : Water demand of district 5, STP: Sewage Treatment Plant, ATP: Advanced Treatment Plant

図 3.4.7 下水・二次処理水・再生水の移送（ケース 3）

3.4.5 下水処理施設配置のための数理最適モデルの有効性

下水処理場の最適な立地を選定するために、提案した数理最適モデルの有効性を検証する。地区5を対象に需要量0から400まで変化させたとき、低地に二次処理施設を建設する通常計画 (Traditional location)と提案モデル (Proposed Model)の最適解の費用比較を行った。費用は、二次及び高度処理施設の建設・運転維持管理費用、送水費用の合計である。図3.4.8に通常計画と提案モデルによる下水処理施設建設・運転維持管理費用の変動を示す。

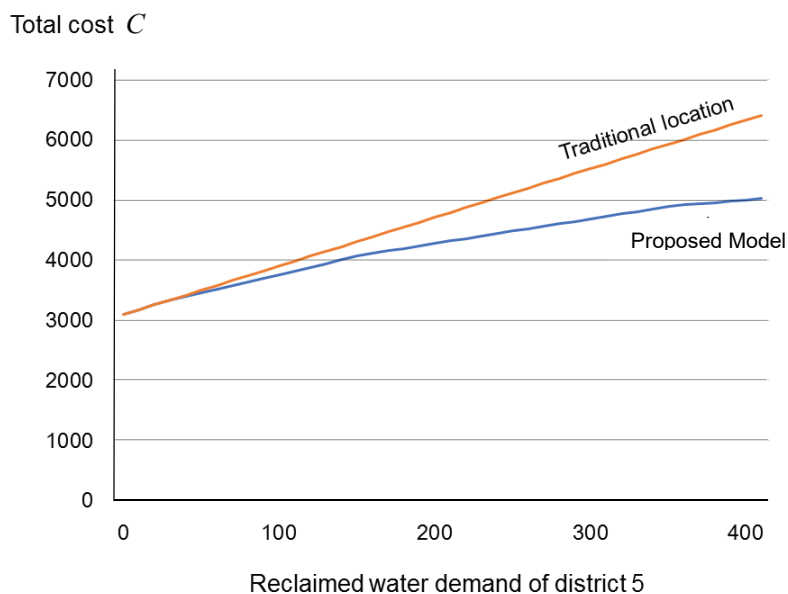


図 3.4.8 提案モデルと通常計画の費用比較

この結果より、水需要量が50を超えた付近から徐々に両者の費用の差が顕著となってくる。水需要量400では、通常計画と比較して提案モデルは最大で20%安価となる。これは今回提案したモデル（下水処理施設の最適配置計画のための数理最適化モデル）を採用することで、二次処理施設と高度処理施設の建設・運転維持管理費用を安く抑えることができることを示しており、提案モデルの有用性を示すことができた。

これは計画当初より各地区の再生水需要量を把握し、再生水利用計画を下水処理計画と併せて立案すれば、下水処理場建設・運転維持管理費用を抑え、最適な位置に施設配置できるモデルである。

3.4.6 本研究の課題

(1) 施設規模の経済性

本研究では、現在の定式化が規模の経済性を考慮していない。つまり施設のスケールメリットによる費用の低減化である。そこで規模の経済性を考慮する場合、規模の経済性を考慮できる形への拡張として、下水道施設建設の費用関数（変数が日最大処理水量）に具体的な規模（処理水量）を入力することになるが、費用関数が非線形であることから非線形の数理計

画問題となる。これは線形計画というシンプルな枠組みの利点を捨ててしまうことになる。

本研究で想定している高度処理方式は、二次処理施設の後段に新設として処理施設を付加する方式とする。よって処理方式は急速ろ過法、活性炭吸着法、膜ろ過等を想定する。急速ろ過法、活性炭吸着法の施設建設費用（二次処理施設との差分）を費用関数より算出した値、また、これら非線形の関数を線形に近似したものを図 3.4.9 に示す¹²⁾。

このため線形計画のシンプルな枠組みを維持するために、非線形の費用関数に線形近似を施すことで、線形問題の枠組みを保ちつつ規模の経済性を扱うことができるようになる。実際、本研究と同様に仮想的な数値設定下で、費用関数の線形近似のもとに最適化計算を試みている研究もある¹³⁾。

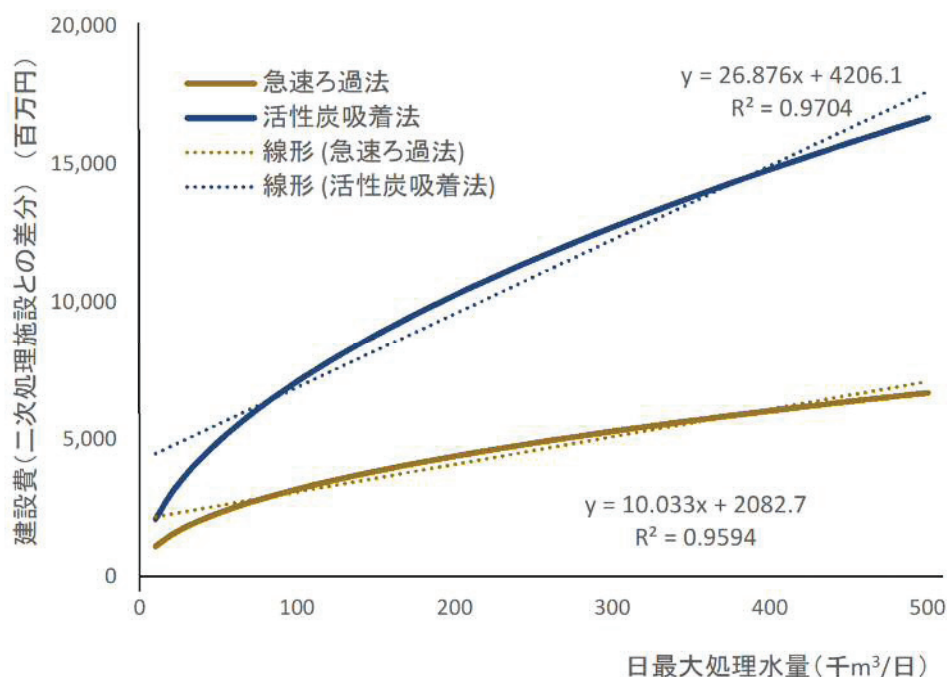


図 3.4.9 三次処理の費用関数と線形近似式

(2) 下水道計画の見直し

もう一つの課題として、最適解にしたがって下水処理場を建設した後に、人口の変化(増加, 減少)とともに水需要量に変化すると、当時得られた最適解が最適でなくなる可能性がある。一般に、下水道計画は定期的に見直され、人口、発生汚水量、都市計画による水需要などが見直され、その都度、下水処理場の増設計画が見直される。しかし、一度供用開始すると施設位置を変更することはほぼ不可能である。

下水道計画の見直しにより施設規模、水需要量が変更となった場合、最適解を得たときの水需要量の範囲が極めて重要となる。その範囲を超えると、将来においては建設した場所が最適とならない。そこで施設立地場所が最適であり続けるために、当該地区の水需要量の上限を把握し、それを超える場合は、現有の処理施設の規模と位置を与条件とし、再計算することになる。一方で、今回提案したモデルで得られた最適解は、地区ごとに人口(=発生下水水量)及び再生水の水需要量をコントロールすることで、将来においても現在と変わらない

ようにすることができる。

3.5 まとめ

本研究では、乾燥地などの水資源に乏しい地域において、安定的に水資源を確保していくために下水処理水の再利用を考慮し、二次処理施設と高度処理施設に区別した下水処理施設の最適な立地計画に関する問題を考えた。具体的には、二次・高度処理施設の最適な建設場所、各地区への再生水の送水量を操作変数として、総費用が施設建設・運転維持管理費用と送水費用の合計で定義される費用関数を最小化する数理計画問題ととらえ、混合整数線形計画法を援用して定式化を行った。続いて、数値計算を実行して解を求めることで、これまで海や河川の近くなど低地に建設されてきた下水処理施設が、処理水を再利用する場合、必ずしも低地での建設が最適解になるとは限らないことを示した。同時に、二次処理施設と高度処理施設の建設地区が必ずしも同じ地区になるとはいえないことも示した。

これは計画当初より各地区の再生水需要量を把握し、再生水利用計画を下水処理計画と併せて立案することで、総費用を抑え、最適な位置に施設配置できるモデルを提案した。

参考文献（第3章）

- 1) 社団法人日本下水道協会，下水道施設計画・設計指針と解説（後編），1994年版，p3
- 2) 原沢英夫，内藤正明，西岡秀三：水環境システムの計画・設計に関する研究レビューと今後の方向について，水質汚濁研究，第4巻，第4号，pp.183-196，1981.
- 3) Pingry, D. E., and Shaftel, T. L., “Integrated water management with reuse: A programming approach”, *Water Resources Research*, 15, no. (1), pp. 8–14, 1979.
- 4) Chen, Y.-T., and Chen, C.-C., “The optimal reuse of reclaimed water: A mathematical model analysis.”, *Water Resource Management*, 28, pp. 2035–2048, 2014.
- 5) Alnouri, S. Y., Linke, P., and El-Halwagi, M., “A synthesis approach for industrial city water reuse networks considering central and distributed treatment systems.”, *Journal of Cleaner Production*, 89, pp. 231–250, 2015.
- 6) Taskhiri, M., and Tan, R., “MILP model for emergy optimization in EIP water networks.”, *Clean Technology Environment Policy*, 13, pp. 703–712, 2011.
- 7) Zadeh, M., A., Sadrania, A., Zibandeh, M., and Rostami, P., “Determining a suitable location for a Sewage Treatment Plant using a new fuzzy weighted average (FWA) method based on left and right scores”, *A paper presented for the 13th Iranian Conference on Fuzzy Systems*, pp.1-6, 2013.
- 8) 坂和正敏：数理計画法の基礎，p.77–91，森北出版，1999.
- 9) 荒井康裕，堀江俊樹，小泉 明，稲員とよの，増子 敦，田村聡志，山本 孝：混合整数線形計画モデルによる送配水システムの電力使用量の最小化，土木学会論文集 G（環境），Vol.68（環境システム研究論文集 第40巻），pp.II_273-II_281，2012.
- 10) 荒井康裕，西江光司，小泉 明，稲員とよの，石田紀彦，山崎千秋，守安純三郎：電力使用量の削減を目的とした大規模な送配水システムへの MILP モデルの適用，土木学会論文集 G（環境），Vol.69（環境システム研究論文集 第41巻），pp.II_149-II_156，2013.
- 11) 土屋 哲，鬼木 哲，谷本圭志，細井由彦：再利用を考慮した下水処理施設の立地計画に関する研究，第70回土木学会中国支部研究発表会発表概要集(CD-ROM)，pp.563–564，2018.
- 12) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部，「流域別下水道整備総合計画調査 指針と解説 参考資料」，平成27年10月，p126
- 13) Joeres, E. F., Dressler, J., Cho, C. C. and Falkner, C. H., “Planning Methodology for the Design of Regional Waste Water Treatment Systems”, *Water Resources Research*, 10, no. (4), pp. 643–649, 1974.

第4章 地域経済分析に基づく再生水導入施策の効果の計測 ～農業部門を対象として～

4.1 はじめに

乾燥地のように水資源に乏しい地域において安定的に水を確保する手段の一つとして、下水処理水の再利用（再生水）が挙げられる。再生水の利用により、水不足の解消や河川・海洋などの水環境保全に期待がかけられているが、具体的に地域経済へのどのくらい効果があるのかは明らかではない。本研究では、水不足が常態化する地域に再生水を導入して農業振興を図る施策を想定し、これにより農業生産が増加する場合の地域経済効果を計測するための方法論を示す。具体的には、再生水導入により水資源量が増加した状況下での最適な品目別生産量を線形計画法により求め、これを農業系部門の最大の生産量とみなして産業連関分析に適用し、地域経済への波及効果を算出する。また、事例分析として本研究の分析方法をオマーン国に適用し、再生水導入の効果を計測する。

しかしながら、質の低い再生水は安価で生産できるものの水質基準が高い用途に利用することができない一方、質の高い再生水は多くの用途に利用できるが生産コスト（下水処理コスト）も高い。ここでは、二次処理水を“低品質の再生水”とし、一方、高度処理水を“高品質の再生水”とした。そこで本研究では、水不足が常態化する地域を想定し、そこに再生水を導入する施策が地域経済に及ぼす効果を計測しうる方法論の提示を第一の目的とする。また、本研究の分析方法を実際の地域に適用し、再生水の導入効果を計測する。その際、質の異なる再生水により地域経済への影響がどのくらい変わるかについても着目する。

4.2 本研究の考え方

4.2.1 問題意識

再生水導入効果の計測は、導入施策の是非を経済分析（費用便益分析）の観点から判断するために必要であるが、そのためには具体的な用途レベルでの計測が求められる。表4.2.1は、再生水の質によって農業灌漑用水として利用可能な用途がどのように異なるかを、米国カリフォルニア州の再生水質基準を例にとり示したものである。カリフォルニア州では、ぶどうなど果実に再生水が直接触れない作物や、米などの加工を前提とする作物の栽培には2次処理レベルの再生水が利用可能であり、キャベツやトマトなど再生水が直接触れ、また生で食するものには3次処理レベル、すなわち高度処理された再生水でないと利用できないとされている。この例からも分かるように、再生水の質によっても効果は異なってくる。すなわち、対象地域の特徴に応じて生産品という細かな分類に着目する方法論が必要となる。農業を例

にとると、農業生産に再生水を用いることでどのくらいの効果があるかを測るには、従来の農業用水に加えて再生水という資源を追加的に使うことで、それが具体的にどの品目の生産に使われ、それによっていくらの効果（売上・利潤や雇用への影響）が生じるかを見なければならぬ。したがって、再生水の用途が「農業」や「工業」といった大まかな区分であれば、導入の効果をきちんと計測できない。

表4.2.1 カリフォルニア州における農業灌漑用水としての再生水の具体的な利用用途と水質の関係

用途	高度処理水	2次処理水
飼料・穀物	○	○
果樹園 (果実と再生水の接触無し)	○	○
食用でない樹木	○	○
加工される穀物	○	○
加工されない穀物	○	×
野菜等	○	×

注：Water Recycling 2030²⁾ をもとに著者が作成

4.2.2 既往研究のレビュー

下水処理場の建設・更新を含めた再生水による農業振興施策は大規模な社会基盤整備事業であり、多大なコストを伴うものである。よって、その効果の計測に当たっては、発現しうる経済効果をもれなく把握できる包括的な評価手法が望ましい。その方法の一つとして、経済波及効果の計測があげられ、代表的なアプローチとして産業連関表を利用した産業連関分析や応用一般均衡分析がある。水政策に係る先行研究として、例えば武藤ら¹⁾は、非市場水を考慮した一般均衡モデルを構築し、ネパール国を対象として水マネジメント施策の経済評価について分析を行っている。こうしたアプローチは、農業政策の経済効果分析にも多数適用されている。しかし、産業連関データのみで依拠するアプローチでは、産業部門より細かな単位で効果を計測することは難しく、4.2.1の問題意識に応えることができない。

これに対して、農作物の生産量あるいは収益の最大化という視点からこれを数理計画問題として定式化し、農作物の最適な栽培・生産パターンを求める研究が古くから数多く行なわれている。中でも線形計画法は代表的なアプローチである^{2),3),4),5)}。線形計画法を用いる場合、目的関数はほぼ共通しているため、問題の着眼がどのような制約条件により記述されるかが研究を特徴づけることが多い。例えば、Choudhuryらは、農業用水としての水資源の希少性に着目し、線形計画法を用いて総生産量を最大にするために水資源を個々の農産品にどれだけ配分するのが最適かを求めている⁵⁾。ただし、線形計画法によるアプローチは経済波及効果を把握できるものではない。

このように、従来の経済分析の枠組みでは大まかな用途でしか計算できない。一方、従来の線形計画問題では細かな用途に着目できるが限定的な効果しかとらえることができない。

4.2.3 本研究の分析方法

以上をふまえ、本研究では、中央政府が再生水の導入による水資源開発を行って農業振興を計画する場面を想定し、利用可能な（再生水を含む）水資源の量をふまえて、どのような品目の農作物をどれだけ栽培・生産することが最も地域経済に効果的なのかを把握しつつ、再生水導入の効果を計測する。これを以下に示す手順で行う。

まず、再生水導入施策が最終的に地域経済にどのくらいの効果をもたらすかを把握するために産業連関分析を用いる。その際、既述したように、分析のデータベースとなる産業連関表が個々の農産品目ごとに独立した部門としては整備されていないため、次のように考える。

- (i) 再生水施策の導入が品目レベルで栽培・生産パターンに影響を及ぼす
- (ii) その変化が最終的に経済効果となって計測される

上記の一連の流れを産業連関表・産業連関分析のみで行うことが難しい。本研究では、上の(i)の部分については線形計画法を援用し、一部品目の生産に再生水が利用可能という状況を制約条件に組み込んで解くことで最適な生産パターンを求め、その結果を産業連関表の農業系部門に集約して産業連関分析に適用することで(ii)を実施し、経済波及効果を求めることとする。この考えを図4.2.1に示す。

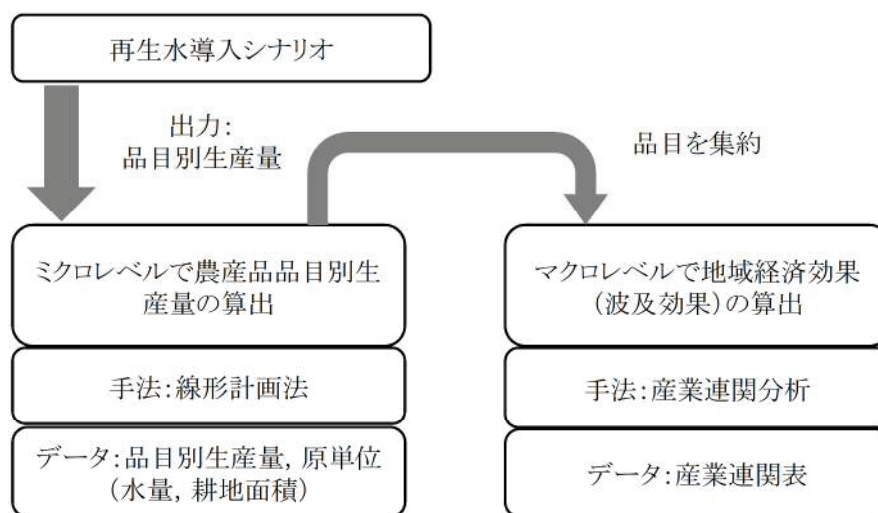


図4.2.1 本研究での線形計画法と産業連関分析の位置づけ

このように、本研究の新規性は、線形計画法と産業連関分析を組み合わせ、産業連関表の部門分類より細かな農産品レベルでの最適な生産パターンの求解と、波及効果の把握をふまえた経済効果の計測にある。本研究では、再生水導入の費用については焦点を当てない。一般に費用便益分析の場合、費用と便益を別々に計測して、再生水導入に伴う費用の増加分と便益の増加分を比較することで分析、評価を行うものである。費用の値が算定できれば、

上記の効果を比較することで費用対効果を明らかにすることができるようになる。

4.3 モデルの定式化

4.3.1 農作物生産量を求めるための線形計画モデル

4.2.3に示した分析手順に基づき、本章では、再生水導入施策評価モデルの定式化について記す。まず、与えられた条件下で農産品の最適な生産量を算出するために線形計画法による定式化を行う。そのときの目的関数は総生産額の最大化であるとし、次式で表す。

$$\max \sum_k \sum_i v_i x_{ik} \quad (4.1)$$

ただし、 v_i は品目*i* の市場価格であり、通年で定数をとるものとする。また、 x_{ik} は第*k*期における品目*i* の生産量を表す。本来、目的関数は生産額よりも利潤や付加価値のほうが望ましいかもしれないが、後の事例分析におけるデータの利用可能性を考え、本研究では式(4.1)のようにおいた。

次に、この問題の制約条件について記す。第一の制約は、生産投入物として必要な水資源量に関する制約である。再生水の利用がないとき、第*k*期に利用可能な水—通常の農業用水のことで、以下、非再生水と記す—の上限量を W_k とすると、この制約は次のように表すことができる。

$$\sum_i a_i x_{ik} \leq W_k \quad (4.2)$$

ここに、 a_i は品目*i* を単位量生産するために必要な非再生水の投入量を表す。

農業生産において、一部の品目に再生水が利用可能である場合、水資源量に関する制約条件式は次のように変化する。

$$\sum_{i \in I_1} a_i x_{ik} \leq W_k + R_k \quad (4.3)$$

$$\sum_{i \in I_2} a_i x_{ik} \leq W_k \quad (4.4)$$

ただし、 I_1 は再生水が利用可能な品目の集合、 I_2 は再生水が利用できない品目の集合を表す。 R_k は第*k*期に利用可能な再生水の総量である。また、係数 a_i は水の質によらずに一定で

あり, 再生水を利用した栽培においても同じ値を用いることができるものとする. すなわち, 再生水が利用できない品目については, 式(4.4)より, 第 k 期に利用可能な非再生水の量 W_k を上限として, これを上回らないように各品目に水が割り当てられる. 一方, 再生水が利用可能な品目については, 式(4.3)より, 第 k 期に利用可能な水の量が非再生水 W_k と再生水 R_k の和を超えないという条件になる. 式(4.4)の制約より, 再生水が利用できない品目の生産に再生水を使うことはないという条件を満たすことは明らかであり, 目的関数の最大化の観点から, 再生水が利用可能な品目の生産には非再生水よりも再生水の投入が優先される.

本研究では, 後の事例分析で低品質の再生水が利用可能なケース, 及び高品質の再生水が利用可能なケースの二つを扱うが, いずれの場合も, 再生水による栽培が可能/不可能な品目の集合が変化するだけであり, 線形計画問題を解く上での水資源量に関する制約条件は上の式(4.3), (4.4)ですべて記述できている.

第二の制約条件は, 作物を生産するのに必要な土地の制約であり, 次式で表される.

$$\sum_i b_i x_{ik} \leq L_k^C \quad (4.5)$$

$$\sum_i b_i x_{ik} \leq L_k^T \quad (4.6)$$

ここに, b_i は品目 i を単位量生産するために必要な土地面積を表し, L_k^C , L_k^T はそれぞれ第 k 期において利用可能な耕作地, 果樹用農地の総量である. つまり本研究では, 耕作地と果樹園のそれぞれにおいてどんな品目を生産するかは意思決定者にまかされているものの, 耕作地と果樹園との間で転用はできないものとする.

第三の制約条件は, 品目ごとに最低限の年間生産量は確保されるという制約であり,

$$x_i \leq \sum_k x_{ik} \quad (4.7)$$

という式で与えられる. ただし, x_i は品目 i が最低限満たすべき生産量を表す. この制約は, 中央政府が自国での雇用や栄養状態の安定的な維持, 他国への継続的な輸出の確保など, 生産する品目の著しい変化(減少)を敬遠する場合の条件である.

このほか, 農作物は品目ごとに固有の栽培・収穫時期があるため, これを栽培時期に関する制約として線形計画問題の制約条件に含めることとする. 具体的には, 第 k 期に品目 i の栽培ができない場合には $x_{ik} = 0$ であり, 栽培可能である場合には $x_{ik} \geq 0$ となる.

以上、式(4.1) 及び (4.3)～(4.7) が、再生水利用の分析を行う本研究の線形計画問題である。目的関数の値を最大にする品目別生産量を x_{ik}^* とするとき、総生産額 X_{agri} は次式で表される。

$$X_{agri} = \sum \sum v_i x_{ik}^* \quad (4.8)$$

これを再生水導入効果の計測にどのように用いるかについては、4.3.3で述べる。

4.3.2 波及効果推計のための産業連関モデル

続いて、線形計画問題により求めた各期・各品目の生産量が、現在の価格で市場に供給できるとの前提の下で、経済波及効果を推計するための産業連関モデルを示す。本研究では、家計を擬制的に産業部門の一つとみなす家計内生モデルを援用する^{6,7)}。家計を内生化しない一般的な産業連関モデルでは、分析シナリオの入力によって誘発される産業生産額や家計所得を求めるところで波及効果の計算が終了するが、家計内生モデルでは、増加した家計所得の消費誘発へのフィードバックが内生的に扱われ波及効果が計算される点が異なっている。

家計内生モデルの定式化は次式で表される。

$$\begin{pmatrix} \mathbf{X} \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I - A & -C \\ -V & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{X}' \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

ただし、

\mathbf{X} : 産業部門別生産額ベクトル

Y : 家計所得

I : 単位行列

A : 投入係数行列

C : 家計所得単位あたりの第*i*品目家計購入額を示す消費係数ベクトル

V : 第*j*産業生産単位当たりの分配家計所得を示す消費係数ベクトル (転置)

\mathbf{X}' : 最終需要ベクトル

である。

式(4.9)の逆行列部分に分割法を用いて、計算を容易に求められるようにする。

$$\begin{pmatrix} I - A & -C \\ -V & 1 \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} B(I + CKVB) & BCK \\ KVB & K \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

$$K = (I - VBC)^{-1} \quad (4.11)$$

ここに、

K : 所得連関乗数

B : 逆行列係数行列

である。最終的に、式(4.9)は、式(4.10)、(4.11)を用いて下の2式となる。

$$X = BX' + BCKVBX' \quad (4.12)$$

$$Y = KVBX' \quad (4.13)$$

4.3.3 線形計画モデルと産業連関モデルの接続

線形計画問題より求まる農業生産額 X_{agri} は、水利用に係る制約条件から見て、これ以上大きくできない値である。一方、産業連関分析では、与えられた最終需要を満たす生産額が計算されるが、生産の波及構造により、最終需要に与えた量以上の生産がなされることとなる。よって、 X_{agri} を式(4.9)の \mathbf{X}' 側に入力してしまうと、それによる波及的な生産の結果として算出される農業部門の生産額が X_{agri} を上回り、水利用の制約条件が満たされなくなる恐れがある。そこで本研究では、農業部門の最終需要の上限値を考える際に、それによる波及的な生産の結果として算出される農業部門の生産額が X_{agri} となるように \mathbf{X}' を与えることとする。すなわち、 X_{agri} は式(4.9)左辺の \mathbf{X} の中の農業部門の値となる。このようにすることで、少なくとも農業部門については水利用の制約条件を満たすようになる。

これを図式化したものを図4.3.1に示す。通常の波及効果計測では、(a)に示すように線形計画問題で求めた生産額を産業連関分析の最終需要の増加分に入力すると、生産の波及を通じてモデルで最終的に実現する生産額が入力値（線形計画問題で求めた値）を上回り、波及的な生産を実現するための水の調達が必要となり、水利用制約条件に矛盾する可能性がある。

そこで少なくとも本研究で焦点を当てている農業部門については、こうした矛盾が生じないよう (b) に示すように線形計画問題で求めた生産額を波及後の生産額とし、線形計画法の解と一致するよう最終需要の増加分を求めた。この結果を用いて、非農業系部門の波及効果を求めた。

なお、厳密には、農業以外の部門で増加する生産にも水投入が必要であり、農業部門のみを考慮した上記のような対応では経済全体で水利用の制約条件を満たしている保証はない点に注意が必要である。

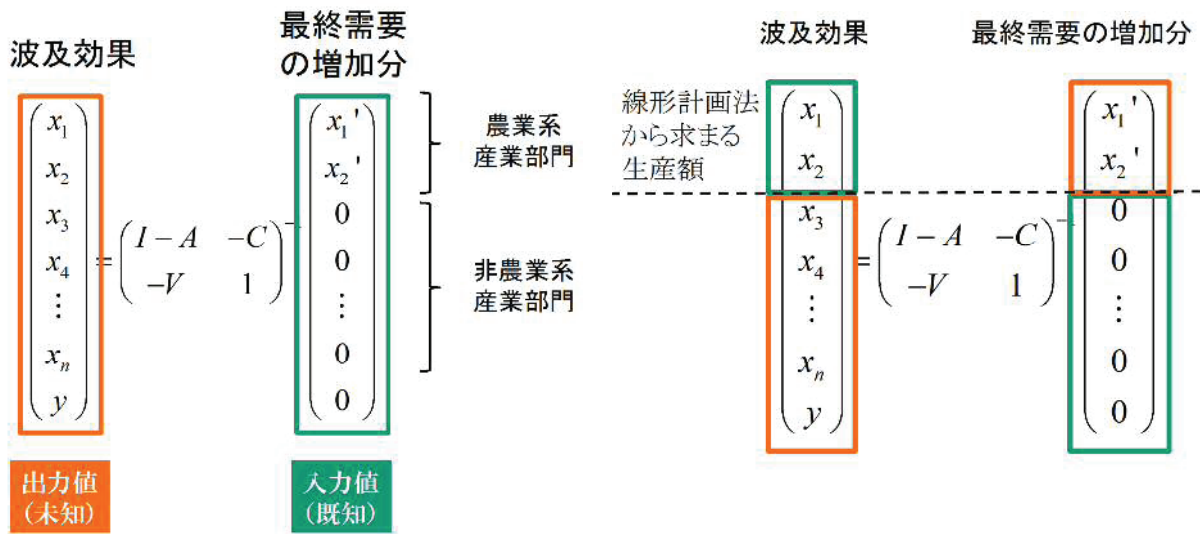


図4.3.1 波及効果推計のための産業連関モデル

4.4 事例分析

4.4.1 分析対象地域及び分析シナリオ

4.3の定式化による分析枠組みを用いて、乾燥地の一つであるオマーン国を対象に事例分析を行う。

図4.4.1に、オマーン（マスカット）と日本（東京）の月別降水量平年値を示す⁸⁾。この図からも明らかなように、オマーンの降水量は極めて少なく、同国の主な水資源は地下水と海水淡水化の2種類であり、表流水は含まれない。

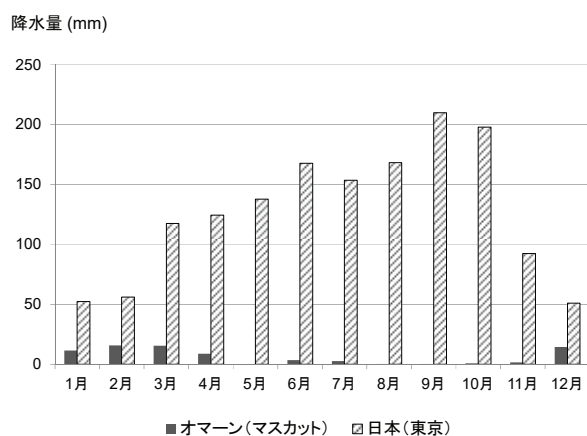


図4.4.1 日本とオマーンの降水量

また、図4.4.2は、オマーンで生産されている代表的な野菜・果物に関して、近年の生産量及び生産者価格の推移を表す⁹⁾。ここに示す6品目（デーツ（ナツメヤシ）、バナナ、小麦、トマト、スイカ、キュウリ）を本事例分析で扱うこととする。図4.4.3に6品目の生産割合を示す。デーツが最も生産量が多く、次いでバナナ、トマトとなっている。この3品目で94%を占めている。

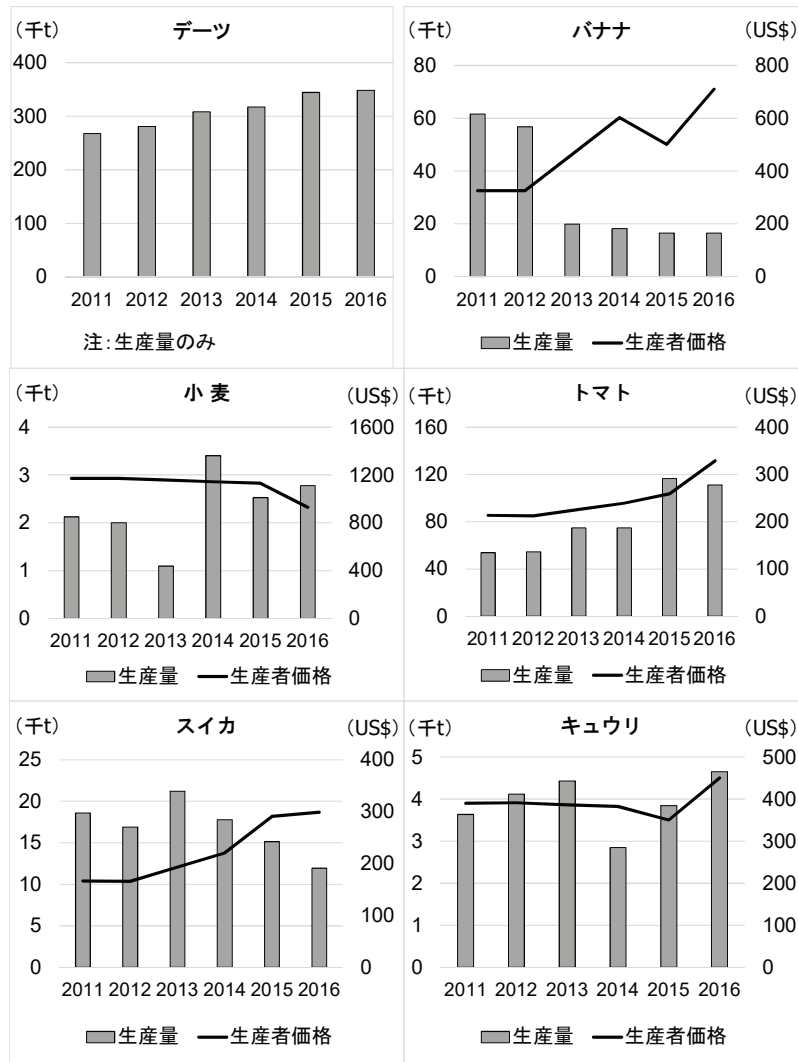


図4.4.2 オマーンの代表的作物の生産量・生産者価格

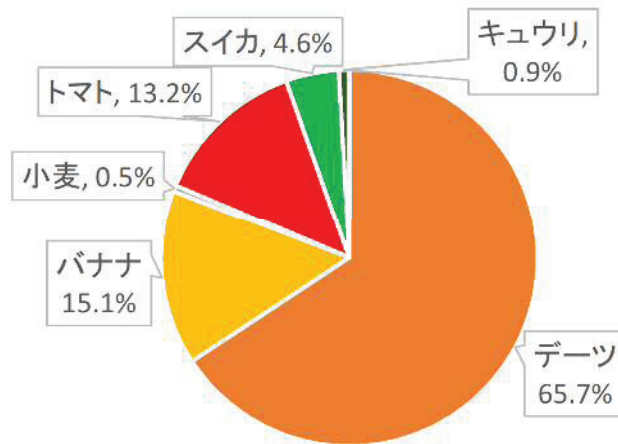


図4.4.3 オマーンの代表作物生産割合

次に、再生水の導入シナリオとして、4.1で定義した低品質再生水（二次処理水）、高品質再生水（高度処理水）の2種類を考える。品質の異なる再生水を同時に扱う状況は想定しない。各品目の栽培に関する再生水の利用については以下のように仮定し、利用可能性の違いで再生水の質を区別する。

- ・デーツやバナナといった果樹においては、水を直接吸収するのは樹木であるため、高品質再生水のみならず低品質再生水による栽培が可能。
- ・小麦は加工後に消費される穀物であるため、高品質再生水のみならず低品質再生水による栽培が可能。
- ・トマト、スイカ、キュウリといった野菜は、人が生で直接口にする可能性があるため、低品質再生水による栽培は認められず、高品質再生水のみが利用可能。

4.4.2 農産品品目別生産量の推計

(1) 農産品データ

本分析で扱うオマーンの代表的農産品6種類について、生産量、1トン当たりの価格の基準値を表4.4.1に示す。各数値の出典は国連食糧農業機関（FAO）である⁹⁾。これらのデータから、 x_i 、 v_i を設定する。同様に、表4.4.2は、作物1トン当たりの生産に必要な水の量及び土地面積を表している。また、表4.4.3は、各品目の栽培・収穫時期に関する条件を示す。本分析では、1年を3期（1月～4月が第1期、5月～8月が第2期、9月～12月が第3期）に分けて計算を行う。表中、○印のついたマスは品目*i*を第*k*期に栽培できること、すなわち $x_{ik} \geq 0$ を意味し、－印のマスは品目*i*を第*k*期に栽培できないこと、すなわち $x_{ik} = 0$ を意味する。例えば、小麦は第2期と第3期で生産可能であるが、第1期に生産することはできない。なお、線形計画法を用いた農業生産の分析では、対象品目の栽培・収穫時期に関する条件を月単位で与える研究が見られるが、今回、オマーンを対象とする事例分析においては対象6品目の栽培・収穫時期について詳細な情報が得られなかったため、粗い区分かつ独自の仮定の下で計算を行っている¹⁰⁾。この点は今後の課題の一つである。また、複数期にわたって生産可能な品目の基準生産量は、年間生産量を等分した値とする。

表4.4.1 代表的農産品の生産量、価格

品目	生産量 (トン)	価格 v_i (US\$/トン)
デーツ	268,011	1,257
バナナ	61,584	523
小麦	2,126	310
トマト	53,742	454
スイカ	18,596	246
キュウリ	3,635	388

表4.4.2 品目1トン当たりの生産に必要な水の量及び土地面積

品目	水 a_i	土地 b_i
デーツ	0.655	0.117
バナナ	0.859	0.071
小麦	2.10	0.302
トマト	0.131	0.020
スイカ	0.182	0.033
キュウリ	0.125	0.018

表4.4.3 各品目の栽培・収穫時期

品目	第1期	第2期	第3期
デーツ	—	—	○
バナナ	—	—	○
小麦	—	○	○
トマト	○	○	—
スイカ	○	○	—
キュウリ	—	○	—

表4.4.4 各期の水資源量・土地資源量

期	非再生水 W_k (万トン)	再生水 R_k (万トン)	耕作地 (L_k^C)	果樹農地 (L_k^T)
第1期	513	5,000	5,086	40,629
第2期	782	5,000	5,086	40,629
第3期	23,068	5,000	5,086	40,629

(2) 水資源データ及び土地資源データ

表4.4.4に、本分析の対象品目生産に関して利用可能な水資源量、及び農地資源量（土地面積）を表す。これらの値の設定・算出方法は次のとおりである。まず、非再生水の数値 W_k は期間ごとに異なるが、これは、各生産期における品目 i の基準生産量に水使用係数 a_i を乗じ、これを品目について和をとった値である。つまり、基準生産量を再現するのに過不足のない量である。また、再生水の量については、その原料が下水であり、一年を通して大きな変動なく得られると考えてもよいことから、オマーン国の生活用水使用量と工業用水使用量の和を3等分（生産期数で等分）した値を R_k として用いることとする。

次に、同表に本分析の対象品目に関して利用可能な土地面積を示す。この値についても非再生水と同様に、各生産期における品目 i の基準生産量に土地係数 b_i を乗じ、これを品目について和をとる。ただし、非再生水とは異なり、農地面積は一年を通じて変わらないものとす

る。よって、各期の基準生産量を再現するのに必要な農地面積が求まったとき、その最大値が L_k となる。

以上より、本研究の線形計画問題は、その制約条件・データの準備方法上、現状、すなわち再生水を考慮しない条件の下で求めた各期の品目別生産量は基準データと一致する。また、一部の生産期においては遊休農地が存在するため、再生水の導入により水資源量が増えることですべての資源制約に余裕が生まれ、農業生産のパターンを変えることができるようになる。これにより、生産額を最大にする農業生産パターンが求まる。

(3) 分析に関するその他の前提条件

本研究ではこれら以外の投入要素を制約条件として考慮することはしない。例えば、労働力は重要な資源であり、これを制約条件に含めた定式化の方がより一般的であろう。しかし、オマーン国の労働統計を見ると、国全体では農業従事者の2倍以上の失業者数があり、若年層失業率も高い¹¹⁾。よって、農業従事者には高い業務スキルが求められないとの前提の下で、労働力は必要に応じて制限なく調達可能であるとの仮定をおいても大きな問題にはならないと考えた。

(4) 農産品品目別生産量の結果

以上のデータ及び前提より、式(4.1)、(4.3)~(4.7)の線形計画問題を解き、総生産額を最大にするような各期の農産品品目別生産量を低品質再生水、高品質再生水それぞれの分析シナリオについて求めた。その結果を表4.4.5及び表4.4.6に示す。また、表4.4.7に分析シナリオごとに年単位に集約した品目別生産量を、施策実施前と比較したものを具体的な数字で示す。図4.4.4には、施策前（現状）=1として、再生水導入後の生産量増加比を示す。

低品質再生水導入シナリオでは、適用可能な品目はデーツ、バナナ及び小麦である。デーツが347.8千トン（施策前の約1.30倍）、小麦は12.9千トン（同6.06倍）となった。バナナには、デーツと比較して1トン当たりの価格が低いことから再生水は導入されなかった。注目すべき点は、低品質再生水が適用できないトマトが71.2千トン（同1.32倍）に生産量が増加したことである。トマトは低品質再生水で直接栽培することはできないが、第2期において小麦の生産に再生水を用いることで余剰となる非再生水が利用可能になるため、価格の高いトマトに非再生水が使用され、生産量が増える結果となった。

表4.4.5 低品質再生水シナリオ下での時期別品目別生産量 (t)

	再生水の利用	第1期 生産量	第2期 生産量	第3期 生産量
デーツ	可能	0	0	347,755
バナナ	可能	0	0	61,584
小麦	可能	0	12,888	0
トマト	不可	13,637	57,545	0
スイカ	不可	18,596	0	0
キュウリ	不可	0	3,635	0

また、高品質再生水導入シナリオでは、全品目に適用できることから価格の高い品目に導入され、果樹農地ではデーツ（同1.27倍）に、耕作地ではトマト（同9.06倍）で生産量が増加し、特に、高品質再生水でしか利用することができないトマトの生産増加量が著しく大きくなった。結果、農産物の生産量合計は、低品質再生水導入では515.6千トン（同1.26倍）、高品質再生水導入では913.8千トン（同2.24倍）と増加し、再生水導入による効果が得られた。

一方、最も価格 v_i が高いデーツの生産量を見ると、高品質再生水シナリオの方が低い。これは、式(4.7)に示す最低限の生産量確保の制約より、小麦の生産を第3期としたことから再生水がデーツと小麦に分配されたためである。

本分析の枠組みからは、高品質再生水シナリオでは、大きな v_i の値を持つトマトの生産が9.06倍、デーツの生産が1.27倍に増える結果となった。低品質再生水シナリオでは、小麦が6.06倍に増えた。

表4.4.6 高品質再生水シナリオ下での時期別品目別生産量 (t)

	再生水の利用	第1期 生産量	第2期 生産量	第3期 生産量
デーツ	可能	0	0	340,939
バナナ	可能	0	0	61,584
小麦	可能	0	0	2,126
トマト	可能	229,480	257,428	0
スイカ	可能	18,596	0	0
キュウリ	可能	0	3,635	0

表4.4.7 年間生産量に関する施策実施前との比較

	高品質再生水シナリオ		低品質再生水シナリオ		施策前 (現状)
	生産量 (トン)	変化 (倍)	生産量 (トン)	変化 (倍)	生産量 (トン)
デーツ	340,939	1.27	347,755	1.30	268,011
バナナ	61,584	1.00	61,584	1.00	61,584
小麦	2,126	1.00	12,888	6.06	2,126
トマト	486,909	9.06	71,182	1.32	53,742
スイカ	18,596	1.00	18,596	1.00	18,596
キュウリ	3,635	1.00	3,635	1.00	3,635
合計	913,789	2.24	515,640	1.26	407,694

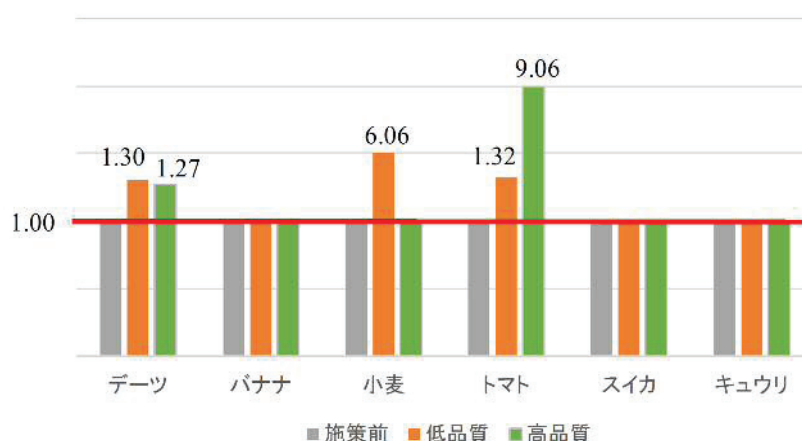


図4.4.4 年間生産量に関する施策実施前との比較

4.4.3 産業連関分析による波及効果の推計

(1) 産業連関データの準備

次に、4.3.2 に記した手順により、再生水導入施策による経済波及効果を推計する。この計算に用いるオマーン国の産業連関表は、GTAP (Global Trade Analysis Project) により整備されたGTAP9 Data Baseを用いて、2005年のオマーン国の社会経済統計より準備する¹²⁾。このデータベースでは産業部門が57セクターに分類されているものの、オマーン国の産業活動の特徴や、本研究で農業にフォーカスを当てていることをふまえて、本研究の計算では次の18部門に集約する：

耕種農業、野菜・果物、その他農作物、畜産、畜産物、生乳、肉、肉製品、林業・漁業、鉱業・原油、加工食品、繊維製品、軽工業、重工業、水道、公益事業（水道除く）、運輸・通信、その他サービス。

本研究で扱っている6品目との対応で言えば、小麦の生産量の増加分は耕種農業部門への入力に、その他5品目の生産量の増加分は野菜・果物部門への入力になる。

(2) 経済波及効果の推計結果

図4.4.5に、低品質、高品質それぞれの再生水導入施策による全産業の生産増加額をグラフ化したものを示す。また、表4.4.8は、各産業部門のほかに家計部門の情報を加え、合わせて施策実施前からの変化率も示したものである。この結果から、再生水導入施策による農産品の需要増加が主として野菜・果物、加工食品といった食品系部門を中心に各産業に波及していることが判る。さらに、家計部門への影響（家計所得の増加額）は、低品質シナリオの場合に0.40億（US\$／年）、高品質シナリオの場合に1.07億（US\$／年）と推計された。

4.4.4 考察

低品質再生水導入施策により、全産業生産額は施策前の0.26%増の2.8億US\$、家計所得額は0.33%増の0.40億US\$増加した。また、高品質再生水導入施策の場合、全産業生産額は施策前の0.69%増の7.3億US\$、家計所得額は0.88%増の1.1億US\$増加した。また、低、高品質再生水導入施策の全産業生産額の差は約4.5億US\$となっており、家計所得額の差は約0.67億US\$となっている。再生水導入施策によりすべての産業で生産額は増加したが、野菜・果実、加工食品、重工業が順に生産増加額が大きく、生産額の増加率で見ると、野菜・果物、小麦、他作物が順に大きかった。再生水導入施策により、食関係の産業の生産額の増加が大きいことが見て取れる。

本研究の試算の結果は、オマーンで再生水導入施策を行う場合に、経済面から実施費用に求められる条件を示すものである。すなわち、施策の実施費用よりも経済効果の方が大きければ、この施策は実施に値する。たとえば、家計所得の増加分を経済効果（便益）と仮定すると、低品質再生水を導入する施策では、その実施コストを0.40億US\$以内に抑えられる場合には、便益が費用を上回り、施策を行う意味がある。また、高品質再生水を導入する施策では、実施コストが1.1億US\$以下であれば、施策を行うべきと判断できる。ただし、この推計により示された数字は、オマーン国全体（国レベル）のものであることに注意する必要がある。費用便益分析の実施という観点では都市レベルで行う方が具体性のある事例分析という意味で良いであろうが、研究の主眼が方法論の開発・提示にあること、及びデータ整備の都合上、今回は国単位での計算としている点に注意が必要である。

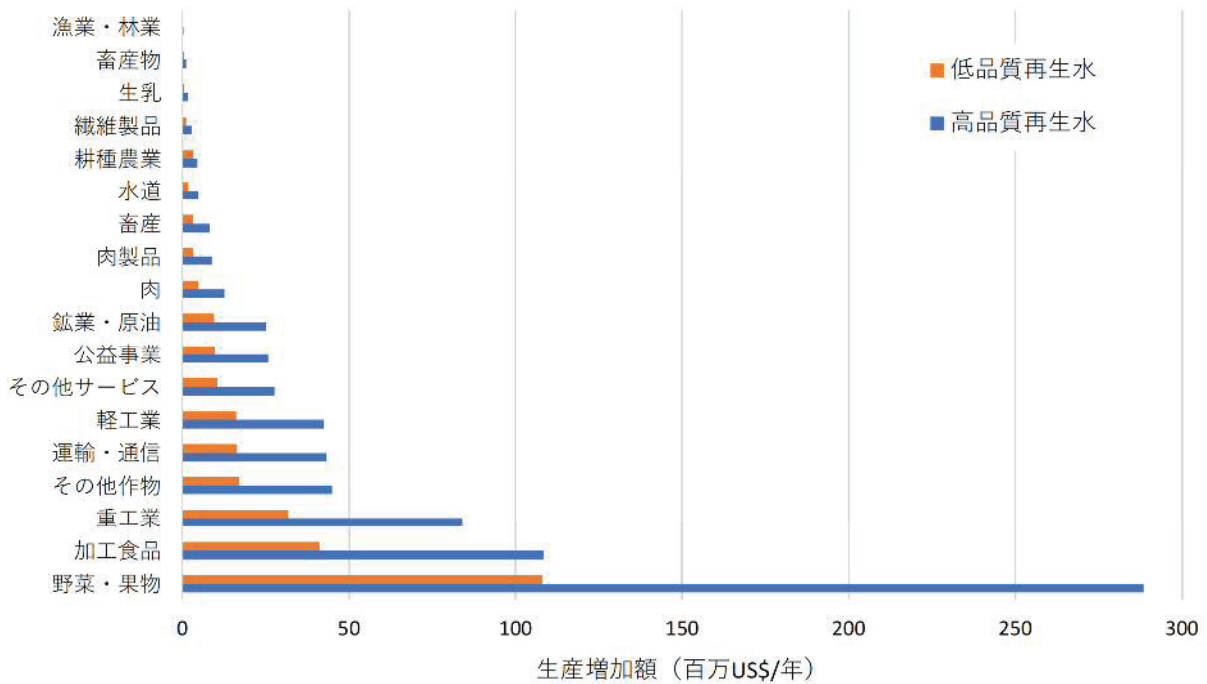


図4. 4. 5 再生水導入施策による産業別の生産額の増加

4. 4. 5 対象農作物変更による感度分析

高品質の再生水を導入した場合、果樹農地ではデーツ、耕作地ではトマトへの投入が生産額を最大化する結果となり、経済波及効果の増加額（高品質再生水の場合）は734.7百万US\$/年となった。これは土地転用の制約を受けつつも価格の高い農作物への投入が、もっとも波及効果が大きいことを示している。一方、最も価格の低いスイカへ投入した場合も波及効果は得られるか、感度分析を行った。

その結果、年間生産量は286.8トン増加し、再生水投入による生産増加量は施策前に比べて1.54%増加した。さらにその波及効果を算出すると256百万US\$/年の増加となり、0.24%の増加率となった。このことから再生水導入施策は、最も価格の低い農作物に対しても波及効果は得られ、施策導入を肯定するものである。この結果は、低品質の再生水でも施用可とするバナナ（価格も下から2番目）においても同様の効果が得られ、高度処理導入の費用面を考慮するとより導入、施用の容易性が高くなると考えられる。

表4.4.8 各施策シナリオ下での経済波及効果の推計結果

産業	高品質再生水		低品質再生水		施策前
	増加額	増加率(%)	増加額	増加率(%)	増加額
野菜・果物	288.53	146.3	108.14	54.84	197.2
加工食品	108.26	10.74	41.11	4.08	1,008.4
重工業	84.06	0.48	31.87	0.18	17,504.2
その他作物	44.89	37.34	17.03	14.17	120.2
運輸・通信	43.19	0.54	16.4	0.20	8,068.1
軽工業	42.36	1.87	16.06	0.71	2,268.8
その他サービス	27.64	0.18	10.48	0.07	15,046.4
公益事業	25.79	0.16	9.79	0.06	15,735.6
鉱業・原油	25.18	0.06	9.55	0.02	43,892.1
肉	12.57	17.57	4.78	6.68	71.5
肉製品	8.79	8.25	3.33	3.13	106.5
畜産	8.21	33.81	3.12	12.85	24.3
水道	4.74	0.28	1.8	0.11	1,693.8
耕種農業	4.49	47.29	3.34	35.12	9.5
繊維製品	2.93	1.48	1.11	0.56	198.00
生乳	1.68	3.18	0.64	1.21	52.7
畜産物	1.04	1.63	0.39	0.62	63.6
漁業・林業	0.35	0.37	0.13	0.14	93.9
産業部門計	734.7	0.69	279.1	0.26	106,154.8
家計部門	107.25	0.88	40.22	0.33	12,187.0

注：生産額，増加額の単位は百万US\$／年

4.5 まとめ

本研究では、水不足が常態化する地域を想定し、そこに再生水を導入する施策が地域経済に及ぼす効果を計測しうる方法論を示した。具体的には、地域経済への波及効果を産業連関分析により計測するが、その際、農業系部門の最大の生産量を設定するのに線形計画法を援用し、再生水導入による最適な農業生産パターンの変化を導出することで、方法論の技術的改善を目指した。

次に、本研究の分析の枠組みを用いて、乾燥地の一つであるオマーン国を対象に事例分析を行い、再生水導入の効果を算出した。その際、再生水の質という観点から、異なる質の再生水によりどのように変化するかにも着目した。再生水の質の差異により地域経済への効果がどのくらい異なるかを明らかにすることで、各施策の導入コストとの比較にもとづき再生水の質をどの水準に定めるのが最適かを判断することが可能となる。

なお、経済全体での水利用制約条件を満足するような分析枠組みへの拡張をはじめとして、本研究は改善に関して検討の余地が残されている。この点を今後の課題としたい。

参考文献（第4章）

- 1) 武藤慎一, 福地良平, 新藤純子 : ネパールにおける水マネジメントの経済評価, 第 43 回環境システム研究論文発表会講演集, pp.1-8, 2015.
- 2) Wankhade, M. O. and Lunge, H. S. : Allocation of agricultural land to the major crops of saline track by linear programming approach: a case study, *Int. Journal of Scientific & Technology Research*, Vol.1, No.9, pp.21-25, 2012.
- 3) Birhanu, K. T., Alamirew, T., Olumana, M. D., Ayalew, S and Dagnachew Aklog : Optimizing Cropping Pattern Using Chance Constraint Linear Programming for Koga Irrigation Dam, Ethiopia, *Irrigation & Drainage Systems Engineering*, Vol.4, No.2, 2015. (open access journal)
- 4) Symum, H. and Ahmed, M. F. : Linear programming model to optimize water supply and cropping area for irrigation: a case study for Kalihati, *Global Journal of Researches in Engineering (G)*, Vol.15, No.2, pp.18-23, 2015.
- 5) Chowdhury, M. A. and Chkrabarty, D. : Optimal crop yield under limited water availability -a linear programming approach, *Journal of Basic and Applied Engineering Research*, Vol.2, No.10, pp.892-895, 2015.
- 6) 宮沢健一編 : 産業連関分析入門, 日本経済新聞社, 1975.
- 7) 居城琢 : 家計内生化による日本経済の CO2 排出構造の変化 産業部門と家計との相互作用, 産業連関, Vol.14, No.1, pp.17-26, 2006.
- 8) 気象庁 : 世界の天候, www.data.jma.go.jp
- 9) Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO): Food and agriculture data, www.fao.org/faostat/en/#home
- 10) 佐藤一郎, 香川邦雄 : オマーンにおける作物生産の現状と問題点, 熱帯農業, Vol.21, No.1, pp.45-52, 1977.
- 11) International Labour Organization (ILO): Statistics and databases, www.ilo.org/global/statistics-and-databases/
- 12) Aguiar, Angel, Badri Narayanan and Robert McDougall: An overview of the GTAP 9 data base, *Journal of Global Economic Analysis*, Vol.1, No.1, pp.181-208, 2016.

第5章 結論

本論文では、水ストレスが高い乾燥地域において、下水処理水の再利用が水資源確保の一助となると考え、再生水利用システムの構築を支援する方法論を検討した。

まず、再生水利用システムの構築方法を開発する前に、再生水を利用することが有効であることを確認する必要がある。そこで再生水導入の可能性について下水処理水の処分方法の予備的検討を行い、再生利用の有効性を確認した。

再生水利用の有効性を確認したうえで、再生水利用を考慮した費用面で最適な下水処理施設の配置方法ならびに再生水利用システムの経済波及効果に関する計測方法を検討し、これをもって再生水利用システムの構築支援方法を提案した。

下水処理水の処分についての予備的検討では、具体的に乾燥地域の新興都市をケーススタディとして、下水処理水処分について4つのオプションを設定し経済的観点から比較した。オプションは、乾燥地域特有の小降水量・高蒸発散量、稀少水源である地下水保全を考慮したうえで、再利用の有効性を確認することから下水処理水の全量再利用（系内、系外）及び全量排水処分（系内、系外）の両極端のシナリオを用いて検討した。その結果、再生水を全量利用することが経済的という結果を得た。

次に、再生水を考慮した最適な下水処理施設の配置計画方法論では、経済的観点から二次処理施設及び高度処理施設を最適に配置するために、混合整数線形計画法を援用して定式化した。これを用いて、処理施設建設・運転維持管理費用と下水・処理水・再生水の送水費用の合計である総費用を最小化する施設配置計画のためのモデルを構築した。

続いて、再生水利用システムの経済的波及効果の計測方法論を検討した。まず、線形計画法を用いて、再生水の導入により増加した水資源量により、生産額を最大にする農業生産量を品目別に算出した。この結果を用いて、農業部門で最大の生産額として産業連関分析に入力することで、各産業部門の生産額の増加分を算出し、この増加額をもって再生水導入による効果を計測する方法を開発した。さらに低品質と高品質の2種類の再生水を導入した場合の経済波及効果を、オマーン国を例に計測した。

以下、具体的な検討を行った各章について、その結果をまとめる。

第2章では、乾燥地域における下水処理水の活用もしくは処分システムの有効性を確認すべく、経済的観点から予備的検討を行った。下水処理水の処分、再利用について4ケースを設定し、費用面で評価を行った。その結果、下水処理水を全量再生水として利用方法が最も安価という結果を得た。

再生水を、上水の代替として散水利用することで、下水処理水の排水処分よりも経済的に有利となり、また、系内で全量再利用することで水循環のクローズド化が構築され、環境保護面からも他のケースと比較して優位となった。

さらに、施設建設費、運転維持管理費及び上水道費用の中で、費用の占める割合が

大きい水道料金の変動を想定し、感度分析を行った結果、水道料金単価の上昇では、全量再利用が最も経済的である結果となり、再生水全量利用が最適解であることがより堅固なものとして実証された。

この結果を受けて、再利用システム構築に向けて、下水処理施設の適切な配置決定方法及びシステムの社会的・経済的な効果を計測する方法論を検討した。

第3章では、乾燥地などの水資源に乏しい地域かつ下水道未整備の地域において、安定的に水資源を確保していくために下水処理水の再利用を下水道計画当初から考慮に入れ、二次処理施設と高度処理施設の最適な立地決定方法に関する問題を混合整数線形計画問題として検討した。

定式化した下水処理施設の数理最適化モデルを処理場の最適な立地を選定するために、モデルの有効性を検証した。5つからなるモデル地区を設定し、需要量を変化させたとき、二次処理施設及び高度処理施設の立地の挙動を考察した。高台の水需要量が大きくなるにしたがって、発生水の収集費用よりも二次処理水及び再生水の送水費用が安価となり、二次・高度処理施設の立地が高台へシフトした。再生水利用を当初から考慮すると、従来計画のように一般的に海や河川の近くなど低地に建設されてきた下水処理施設が、必ずしも低地での建設が最適解になるとは限らないことを示した。

次に二次・高度処理施設の建設・運転維持管理費用を低減させた場合を検討した。その結果、複数の地区に施設を立地させることが最適となるケースが見られた。これは、処理場の建設・運転維持管理費用が送水費用に対して相対的に低くなると、水需要の高い地区へ立地することが経済的であることを示すものである。

提案モデルの有効性を示すため、低地に二次・高度処理施設を建設する通常計画 (Traditional location)と提案モデル (Proposed Model)の最適解の費用を比較した。結果、通常計画と比較して提案モデルは設置モデル地区において最大で20%安価となる結果を得た。これは今回提案したモデル（下水処理施設の最適配置計画のための数理最適化モデル）を採用することで、二次処理施設と高度処理施設の建設・運転維持管理費用を安く抑えることができることを示しており、提案モデルの有用性を示すことができた。

計画当初より各地区の再生水需要量を把握し、再生水利用計画を下水処理計画と併せて立案すれば、下水処理場建設・運転維持管理費用を抑え、最適な位置に施設配置できるモデルを提案できた。

課題として、現在の定式化が規模の経済性を考慮していないことである。規模の経済を反映するため、下水道施設建設の費用関数を用いることができるが、費用関数が非線形であることから非線形の数理計画問題となる。これは線形計画のシンプルな枠組みの利点を損なうことになる。そこで非線形の費用関数に線形近似を施すことで、線形問題の枠組みを保ちつつ規模の経済性を扱うことができる。

もう一つの課題として、最適解にしたがって下水処理場を建設した後に、人口や水

需要量が変化すると、得られた解が最適でなくなる可能性がある。その際、最適解を得たときの水需要量の範囲が重要となり、人口及び再生水の水需要量をコントロールすることが求められる。

第4章では、再生水の用途に着目し、水不足が常態化する地域に再生水を導入して農業振興を図る施策により農業生産が増加する場合の経済効果を計測するための方法論を示した。

オマーン国の農産物を取り扱い、下水処理水を低品質（二次処理水）と高品質（高度処理水）の2種類を設けた。低品質再生水導入シナリオでは、適用可能な品目はデーツ、バナナ及び小麦である。生産量は、デーツが再生水導入施策前の約1.30倍、小麦は6.06倍となった。バナナには、デーツと比較して1トン当たりの価格が低いことから再生水は導入されなかった。一方で、低品質再生水が適用できないトマトは1.32倍の生産量となり、増加した。これは、トマトに対しては低品質再生水で直接栽培することはできないが、小麦の生産に再生水を用いることで余剰となった非再生水が利用可能になるため、価格の高いトマトに非再生水が使用され、生産量が増える結果となった。

次に高品質再生水導入シナリオでは、全品目に再生水が適用できることから価格の高い品目に導入された。生産量は、果樹農地ではデーツが1.27倍に、耕作地ではトマトが9.06倍と増加し、特に、高品質再生水でしか利用することができないトマトの生産増加量が著しく大きかった。結果、農産品の生産量合計は、導入前と比較して、低品質再生水導入では1.26倍、高品質再生水導入では2.24倍と増加した。

続いて、線形計画モデルと産業連関モデルの接続を行うべく、線形計画問題で求めた生産額を波及後の生産額とし、線形計画法の解と一致するよう最終需要の増加分を求め、非農業系部門の波及効果を求めた。

低品質再生水導入施策により、全産業生産額は施策前の0.26%増、家計所得額は0.33%増加した。また、高品質再生水導入施策の場合、全産業生産額は施策前の0.69%増、家計所得額は0.88%増加した。また、低、高品質再生水導入施策の全産業生産額の差は約4.5億US\$となっており、家計所得額の差は約0.67億US\$となっている。再生水導入施策によりすべての産業で生産額は増加したが、野菜・果実、加工食品、重工業が順に生産増加額が大きく、生産額の増加率で見ると、野菜・果物、小麦、他作物が順に大きかった。再生水導入施策により、食関係の産業の生産額の増加が大きい結果が得られた。

再生水の質の差異により地域経済への効果の差を明らかにすることで、各施策導入コストとの比較により、再生水の水質基準設定の判断に役立てられる。

本検討の一番の新規性は、線形計画法と産業連関分析を組み合わせて、産業連関表の部門分類より細かな農産品レベルでの最適な生産パターンの求解と波及効果の把握をふまえた再生水導入効果の計測方法の提案にある。地域経済への波及効果を産業連関分析により計測する際に、農業系部門の最大生産量を設定するために線形計画法を援用した。

課題として、農業部門以外の部門でも増加する生産に水の投入が必要とすることである。農業部門のみを考慮するだけでなく、経済全体での水利用制約条件を満足するような分析枠組みへの拡張が改善の余地として残されている。

本研究では、再生水の利用可否の判断支援を提案し、再生水を当初から見込んだ最適施設配置計画の支援、さらに再生水を用いた場合の経済的波及効果の計測方法支援を提案できた。これらにより乾燥地域における再生水利用システムの構築支援の一助となれば幸いである。

謝辞

鳥取大学工学研究科博士後期課程への勧めをいただいたのは、鳥取大学副学長 細井由彦先生でした。細井先生には鳥取大学工学部での研究室開設当初、学部4年生から大学院修士課程までご指導、激励を賜りました。大学院修了後、会社で海外業務に携わることが多くなり、今一度、学業の重要性を感じているところ、社会人博士課程へ導いてくださりました。挫折しそうなところを何度も救いの手を差し伸べていただき、終始あたたかいご指導を賜り深く感謝いたします。

鳥取大学工学研究科社会基盤工学専攻 公共システム研究室 谷本圭志教授、土屋哲准教授には、研究の考え方、方向性を示していただきました。同時に研究の面白さ、楽しさ、課題から見えてくる研究の発展の可能性を学びました。時には膝をつき合わせ、私の愚問にも真剣に受けていただき、また、研究の進め方やまとめ方に細かいところまで相談に乗っていただきました。心より御礼申し上げます。

鳥取大学工学研究科社会基盤工学専攻 環境計画研究室 増田貴則准教授には、お忙しい中、論文の書き方に始まり、構成やまとめ方をご指導いただきました。特に他研究との関連性やその重要性を教えていただき、研究への姿勢を学びました。深く感謝いたします。

研究の足がかりとなった乾燥地域における再生水利用の研究では、当時大学院生だった宮尾徹さんと一緒に研究に取り組みました。深く感謝いたします。

最後に本研究をまとめるまでにご協力、ご支援いただいた皆様に深く御礼申し上げます。

2019年1月 鬼木 哲