

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24404005

研究課題名(和文)中国深せん市の最適水循環構築に向けた水質実態調査と環境政策への反映

研究課題名(英文)Water quality survey in Shenzhen, China for the development of sound water circulation system and its reflection to environmental policy

研究代表者

水野 忠雄(MIZUNO, TADAO)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：00422981

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、中国深せん市を対象として、下水再生水利用による新たな水循環の構築を目的として研究を行った。遠方からの導水と、下水再生水を貯水池へ注入し、浄水原水として利用するシナリオに関して二酸化炭素の排出量による評価を行ったところ、膜処理を用いた下水再生水の生産では、遠方からの導水よりも有利であることが分かった。オゾン処理を追加することによりエネルギー消費量は増大するものの、水質向上の効果が見込めることから、安定した水資源供給の観点からは、さらなる議論の余地があると考えられた。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to discuss and propose a new water circulation system using reclaimed wastewater as a water resource in Shenzhen, China. A scenario compared the utilization of the reclaimed wastewater inside the city as the water source with a long distance water conveyance from a river, in terms of the amount of the carbon dioxide emission. The use of the reclaimed wastewater produced by a membrane treatment process has some advantage rather than the water conveyance. Although the use of ozonation with the membrane treatment process required more energy, the process is still a promising one because the additional ozonation is able to enhance the quality of water and the use of reclaimed wastewater is able to provide the stable waste resource in quantity and quality.

研究分野：水処理工学

キーワード：最適水循環 実態調査 環境政策

## 1. 研究開始当初の背景

本研究で調査対象とした中国広東省深圳市は、改革開放政策の推進により 1980 年に中国で初めて経済特区が設置されて以来急速に成長し、2008 年に一人当たりの GDP が一万ドルを超えるなど経済発展都市であるとともに、人口は 1000 万を超える、いわゆるメガシティの一つである。巨大な人口および経済発展の著しい地域であるために水需要量も多く、2010 年度の原水供給総量は約 19 億 m<sup>3</sup>であった。一方で、市内には水需要をまかなうだけの水源がなく、近隣の都市を流れる河川からの導水で約 70%を賄っていた。降水量は、しばしば水不足が指摘される北京市の 600 mm/年に比べては多く、日本の平均降水量に匹敵する 2000 mm/年弱と比較的豊富であるが、全降水量の 85%は 4~9 月のいわゆる雨季に偏り、降水の 70%は海へ流れ込むなど市内での利用可能水量は十分とは言えない状況にある。また、導水を行っている河川の流域には、人口 1000 万を超える広州市をはじめ、1000 万に迫る多くの都市を抱え、これらの都市への水量・水質両面からの安定的な水供給とこれらの都市からの水質汚染防止による水環境保全が喫緊の課題とされており、都市の持続的発展にも直結する重要な課題となっている。このような背景から深圳市では水量・水質の確保のために、比較的水量豊富・水質良好な別の河川からの水源としての導水が計画されていた。

一日供水能力は 700 万 m<sup>3</sup>に迫る一方、都市下水処理量は一日 300 万 m<sup>3</sup>弱であり、今後の下水道の普及が必要と考えられた。ただし、下水処理の高度化や下水の再利用への意識は高く、比較的大規模な 6 つの下水処理場では再利用施設を建設済みもしくは計画が進んでいることから、下水処理能力の増強を期待しつつ、下水再生水を水資源とした、新たな水循環系を検討するに値するのではないかと考えられた。

## 2. 研究の目的

深圳およびその周辺都市は、アジア新興国のメガシティの中でも、すでに比較的環境インフラの整った都市であり、個別の対応は進歩的である一方、さらなる高度化や統合的な水環境管理政策が求められるメガシティであると考えられた。

背景においても指摘したとおり、深圳市の属する中国華南地区は亜熱帯性海洋気候に属するため比較的水量は豊富であると考えられているが、深圳市はその地形や急激な人口増加、経済発展から水資源量は必ずしも十分でなく、深圳市の持続可能な発展や周辺地域との調和を考えたときには、下水をはじめとする新たな水資源の開発の必要性と、それをういた新たな水循環系を構築していくことが重要であると考えられた。そこで、最終的には、下水再生水を浄水水源と位置付け、貯水池に戻した上で利用するというシナリ

オを設定し、水質、エネルギーなどの観点から、深圳市の最適な水循環に関して検討を行うことを主な目的とした。その際には、当該地域の水事情の把握として、公開情報の収集に努めるとともに、今後の政策の方向性に関してもインタビューを含めて情報の収集および整理を行うこととした。また、一部現地での水質調査を行い検討への反映を行うこととした。

## 3. 研究の方法

### (1) 当該地域情報の収集および整理

環境関連の法律・規制・基準などに関しては、公開情報をもとに整理を行った。また、その他の当該地域の水環境事情に関しても、公開情報およびインタビューを通じて行った。さらに、当該地域において検討されている今後の政策の方向性や規制の導入・強化に関しても公開情報およびインタビューを通じて行った。

これらに加えて、水質情報に関しては、現地調査も実施した。水源となる河川については、上流から下流まで 5 地点を選定した。市内河川については、下水再生水が放流されている 4 河川を選定し、それぞれの河川で上流および下流の 2 地点を選定した。この時には、その中間位置で下水再生水が放流されるように地点の選定を行った。

対象とする水質項目は、一般水質項目として、有機炭素(全、溶存)、窒素(全、溶存、アンモニア、亜硝酸、硝酸)、りん(全、溶存、オルト)、浮遊物質(SS)、濁度、電気伝導度、溶存酸素、大腸菌(群)、糞便性大腸菌などとした。また、環境中に極低濃度で存在し、ヒトや水生生物への影響が懸念される化学物質についても測定を行った。さらに、総合的な水の安全性を評価することを目的に、バイオアッセイも実施した。バイオアッセイとしては、レポータージーンアッセイ系として、細胞を水試料に曝露した際に生じるルシフェラーゼの発光量を測定することで、エストロゲン様活性を定量できる方法を適用した。一部の水質項目は、調査地点で測定を行い、その他の水質項目については、当該地域に設置している京都大学-清華大学環境技術共同研究・教育センター内の実験室にて、測定もしくは前処理を行った。

### (2) 新たな水循環系のシナリオ

新たな水循環系としては、下水再生水を浄水水源と位置付け、貯水池に戻した上で利用するというシナリオを設定し、必要となるエネルギー量を二酸化炭素排出量に換算して評価した。その際には、2020 年時点での当該地域での最大不足水量を年間 5 億 m<sup>3</sup>として、これを下水再生水を貯水池へ戻すことで補うとした。下水処理場の選定としては、現状および計画処理水量、現在の利用用途、貯水池との位置関係などを考慮した。最終的には、7 つの下水処理場から 4 つの貯水池へ再生水を流入させることとした。また、比較シナリ

オとして、現在当該地域でも検討が行われている、比較的水量が豊富で、水質もよいとされる西方に位置する河川からの遠方導水を検討した。なお、下水の再生にかかるエネルギーの評価には、当該地域で行っているパイロット規模の実験装置の処理結果から得られる値を利用した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 河川水質

水源となっている河川の水質を全窒素(TN)および全リン(TP)を例として図1に示す。流下方向に濃度の上昇が認められ、産業活動その他による汚染があることがわかる。ただし、最上流部においては、水道原水としての水質を満たしうる最低基準である 類を満たす時期および水質項目が多かった。また、本研究期間以前からの時間的な変遷を見ると、TNではほとんど変化が認められなかった一方、TPについては、低減が認められ、類を満たす水質に安定してきていたことから、当該流域では、ある程度下水道の整備が進んでいることが示唆された。実際に下水道の整備が進んでいることが報告<sup>1)</sup>されていることから、その対策の効果が出ていると考えられた。農業、医薬品などの極低濃度に環境中に存在するとされる有機物質については、物質によっては流下方向に濃度が上昇する場合があったが、その濃度は、その他の国や地域で公表されている値と比較しても高くはなかった。

市内河川の水質を全有機炭素(TOC)および浮遊物質(SS)を例として図2に示す。河川AおよびDは、上流部に貯水池があり、河川B

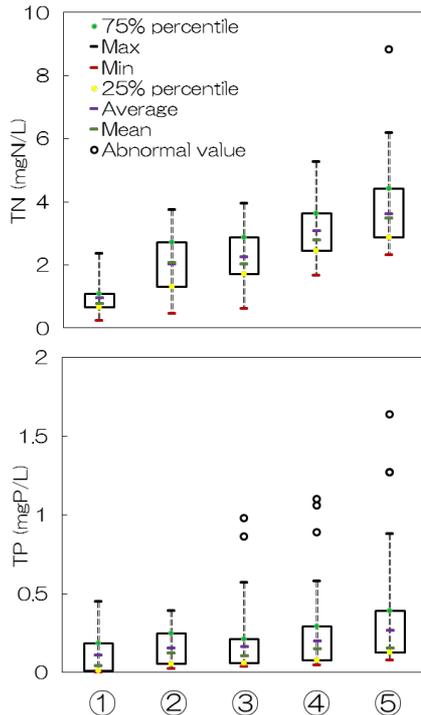


図1 水源河川における全窒素および全リン濃度 (上流 下流: )

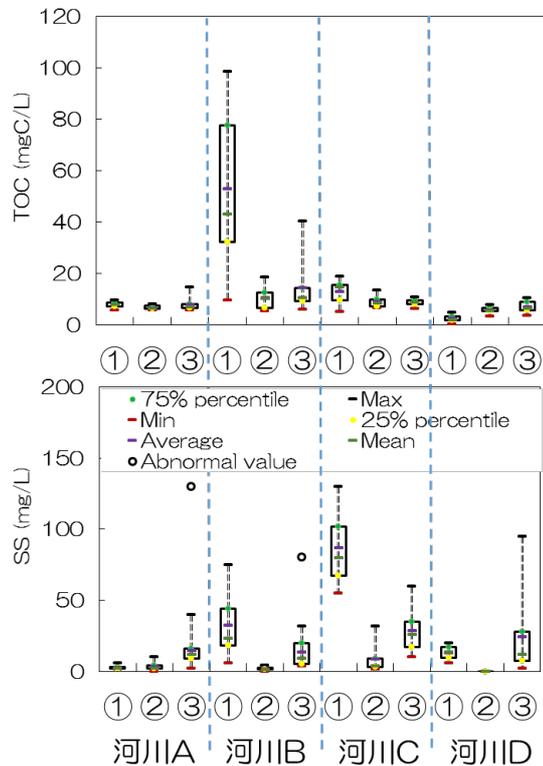


図2 市内河川における全有機炭素および浮遊物質濃度

(上流 下流: 、 は再生水)

(河川流下方向: 南 北、西 東: A D)

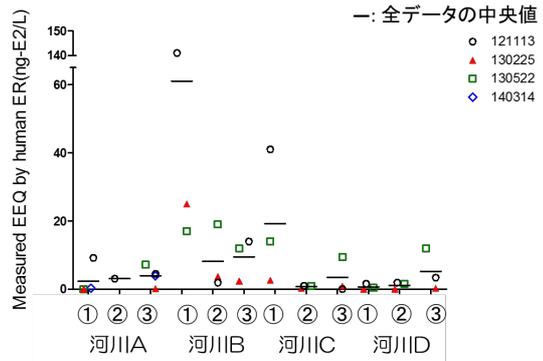


図3 市内河川におけるエストロゲン様活性(ヒト ERα)の定量結果

およびCは、上流部が下水道未整備の河川である。貯水池が上部にある河川では、上流部( )の水質は比較的良好であり、下水再生水水質と同程度か、それよりも良好であった。一方で、上流部が下水道未整備の河川では、河川上流部の水質はあまり良くなかった。ただし、そのことにより下水再生水の河川放流による希釈効果により、河川浄化が認められた。すなわち、今後下水道の整備により、河川上流部においても、その水質は改善されると考えられるが、現在の流域下流部の下水処理場からの再生水を河川上流部(中間部)に戻すことにより水質浄化に寄与していると言えた。

内分泌かく乱性の視点から、ヒト ERαを用いてエストロゲン様活性を定量的に評価した結果を図3に示す。個別水質項目と同様の結果が得られ、河川AおよびDにおいては、上流部のエストロゲン様活性が最も低く、下水再生水および下流部の方が高い結果となった。また、河川BおよびCでは、再生水の放流により河川水中のエストロゲン様活性の緩和効果があると考えられた。

## (2)水資源確保/利用に関する政策

深圳市政府の水環境・水資源に関する主な政策<sup>2)</sup>は、以下のとおりである。また、該当する水環境整備と水資源開発目標の計画内容とその目標値を表1に示す。

### 都市供水システムの構築

浄水処理能力の向上およびそれに伴う普及率の向上が予測されている。浄水場における供水能力としては、729万m<sup>3</sup>/日を見込んでいる。また、最大給水能力の85%程度にあたる22.5億m<sup>3</sup>/年の原水供給能力が見込まれている。これにより、都市内の供水率としては97%以上、飲用水としての普及率は100%になると想定されている。

### 新たな水資源の開発

新豊江や西江からの導水について前期調査も含め計画されている。また、下水再生水、雨水の利用など未開発水資源の開発が計画されている。

### 生態的都市水環境の構築

#### 新都市排水システムの構築

下水道事業を通じた水環境保全に取り組むことが計画されている。下水処理量としては、542万m<sup>3</sup>/日になると予測されている。また、生態環境から見た市内河川、ダムなどの

改善・改修が計画されている。

### 新都市節水システムの構築

浄水供給における配水管からの漏水率の低減、工業内での単位生産量あたりの水使用量の低減、再利用率の向上、下水の再生利用率の向上などが、強制力を持って計画されている。この中で、工業用水の再生利用率は90%以上、下水の再生利用率は50%以上を掲げている。

また、表2に深圳市における水資源量の試算<sup>3)</sup>を示す。これによると、2015年および20年時点での水資源量は、それぞれ23.8億m<sup>3</sup>/年および25.3億m<sup>3</sup>/年と見込まれているが、市内における利用可能な水資源量はほぼ変わらず、現在行われている市外からの導水量を増加させ、雨水および下水再生水といった新たな水資源に依存する構図となっている。2015年時点での下水の再生水利用量は、1.5億m<sup>3</sup>/年となっているが、一方で、下水の再生水生産量としては、約10億m<sup>3</sup>が計画<sup>2)</sup>されている。

### (3)水循環系のシナリオ

水循環系のシナリオとして、試算による2020年時点での現在からの水資源量の増加分、5億m<sup>3</sup>/年(137万m<sup>3</sup>/日)を下水再生水で賄うこととした。これは、試算においてもわかるとおり、水資源量の増加の大部分は実際には市外からの導水量の増加によって賄われているが、原水にあたる河川流域にも多くの大都市を抱え、水の量・質ともに不確定要因が含まれるため、より安定的に供給可能な下水再生水の利用を想定することに妥当性があると考えたからである。また、実際に下水再生水の生産量もこの不足分を超える量が計画されていることから、実現性もあると考えた。

下水再生水は、近傍の貯水池へ戻し、浄水水源として利用することとした。下水処理場の選定としては、現状および計画処理水量、現在の利用用途、貯水池との位置関係などを考慮した。最終的には、7つの下水処理場から4つの貯水池へ再生水を流入させることとした。また、比較シナリオとして、現在当該地域でも検討が行われている、比較的水量が豊富で、水質もよいとされる西方に位置する河川からの遠方導水を検討した。シナリオ計算に用いた数値等の概要を表3に示す。なお、下水の再生にかかるエネルギーの評価には、当該地域で行っているパイロット規模の膜処理実験装置の処理結果から得られる値を利用した。また、評価は必要となるエネルギー

表1 深圳市における水環境整備と水資源開発目標

計画内容	実施指標	2015年目標値	指標属性
都市供水 安全保障	都市供水保証率	≥97%	予期性
	原水供給能力	≥22.5億m <sup>3</sup> /年	予期性
	浄水場生産能力	≥729.0万t/d	予期性
	飲用水普及率	100%	強制性
都市水環境改善	集中式飲用水源地 水質基準合格率	100%	強制性
	都市汚水集中処理率	中心市区≥95%、 その他市区≥80%	強制性
	汚水処理場処理能力	542.0万t/d	予期性
	汚泥無害化処理率	100%	強制性
都市節水	単位生産量当たりの 水使用量	2010年に比べ、 累計20%削減	強制性
	供水管路漏水率	≤12%	強制性
	工業用水利用率	≥90%	強制性
	節水器普及率	≥98%	強制性
	都市再生水利用率	≥50%	強制性

表2 深圳市における水資源量の試算<sup>3)</sup>

年度	市内利用可能水資源量 (億m <sup>3</sup> )				市外引水 億m <sup>3</sup> )	雨水利用 (億m <sup>3</sup> )	再生水利用 (億m <sup>3</sup> )	合計 (億m <sup>3</sup> )	水資源負荷 指数
	地表水利用 可能量	地下水利用 可能量	重複計算量	小計					
2008	—	—	—	6.00	16.63 (13.37)	0.02	0.87	20.26	危機
2015	4.24	3.92	3.04	5.12	16.63	0.58	1.5	23.83	超負荷
2020	4.74	3.92	3.04	5.62	16.63	1.08	2.0	25.33	超負荷

表3 シナリオ計算の概要

( は、各処理場の消費電力量を  
137 万 m<sup>3</sup>/日で割った値)

項目	遠方導水	污水処理場→
延長(km)	148.5	1.5~14.1
送水延長(km)	111.2	1.5~12.5
送水量(万m <sup>3</sup> /日)	137	2.5~50.4 (合計:137)
実揚程(m)	85.7	16.0~80.2
全揚程(m)	126	19~85
消費電力量(kWh/m <sup>3</sup> )	0.523	0.003~ 0.121※

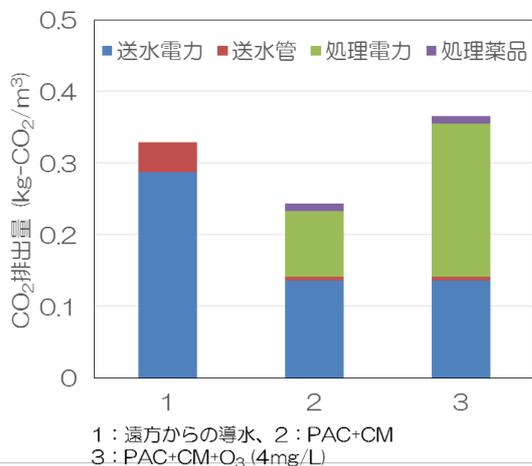


図4 シナリオ計算における

二酸化炭素排出量を評価とした比較  
(PAC:凝集剤、CM:セラミック膜処理、  
O<sub>3</sub>:オゾン処理(注入率4 mg/Lの場合))

一から二酸化炭素排出量として行った。

シナリオ計算における二酸化炭素排出量を評価とした、遠方からの導水、膜処理(凝集剤の添加含む)、および膜処理(凝集剤の添加含む)に注入率4 mg/Lのオゾン処理を後段に導入した場合の結果を図4に示す。延長や揚程からもわかるとおり、送水電力に関しては、再生水利用が優位であった。また、再生水生産に膜処理(凝集剤の添加含む)のみを用いた場合には、遠方からの導水に対して優位であることが分かった。オゾン処理を導入した場合には、オゾンの発生にかかる電力消費量が増大するため二酸化炭素排出量が増加するものの、遠方からの導水と比較して大きな差はなかった。このことから、水質面も含めて検討の余地があると考えられた。特に、下水の再生利用では、水源河川における不安定性や不確実性を排除できることから、必ずしも費用やエネルギーのみによって判断できないこともあることから、よりいっそうの

詳細な検討を加えることで、その可能性も高まると考えられた。

#### 引用文献

- 1) 中华人民共和国环境保护部:「关于公布2013年全国城镇污水处理设施名单的公告」,环境保护部公告,公告2014年第26号,2014年4月3日.
- 2) 深圳市人民政府办公厅:「关于深圳市水务发展“十二五”规划的批复」,深圳市人民政府办公厅函,深府办函(2012)10号,2012年2月2日.
- 3) 張金松:深圳市水環境, 10th Japan-China Symposium on Water Environment, 2012.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔学会発表〕(計9件)

- 1) 水野忠雄, 八十島誠, 馬寅 (2013) 中国華南地区における新たな水循環系の構築, 京都大学環境衛生工学研究会第35回シンポジウム, 京都 (ポスター)
- 2) 馬寅, 水野忠雄, 八十島誠 (2013) 深圳の水源となる東江および市内河川水質の実態調査, 京都大学環境衛生工学研究会第35回シンポジウム, 京都 (ポスター)
- 3) Mizuno, T., Ma, Y., and Yasojima, M. (2013) Current Situation of Water Shortage and Its Countermeasures in Southern China, Research and Education Center for the Risk Based Asian Oriented Integrated Watershed Management, 3rd Comprehensive Symposium, Kyoto (poster)
- 4) 水野忠雄, 馬寅, 八十島誠 (2013) 中国華南地区における新たな水循環系の構築に向けて, 美ら島, 未来のおきなわ, 水の循環利用シンポジウム, 沖縄 (ポスター)
- 5) 馬寅, 水野忠雄, 八十島誠 (2013) Water issue and water reuse of the mighty city in southern China, 京都大学-清華大学-JST CREST 日中環境技術共同研究・教育の促進に関するシンポジウム, 深圳 (ポスター)
- 6) Ma, Y., Mizuno, T., and Yasojima, M. (2014) Water issues and water reuse of mega cities in southern China", , CREST International Symposium on Development and Evaluation of Water Reuse Technologies for the Establishment of 21st Century Type Water Cycle System in Danang, Vietnam, Danang (poster)
- 7) Mizuno, T., Ma, Y., and Yasojima, M. (2014) Introduction to Water Issues in Southern China, CREST International Symposium on Water Environment in Da

Nang and New Approaches forward to 21st Century Type Water Cycle System, Danang, Vietnam

- 8) 水野忠雄, 馬寅, 八十島誠 (2015) 中国深圳市を中心とした華南地区における新たな水循環系の構築に関する検討、第3回 21世紀型都市水循環のための水再生技術の開発と評価に関するシンポジウム、東京

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

水野 忠雄 (MIZUNO, Tadao)  
京都大学・大学院工学研究科・講師  
研究者番号：00422981

##### (2) 研究分担者

井原 賢 (IHARA, Masaru)  
京都大学・大学院工学研究科・研究員  
研究者番号：70450202

##### (3) 研究協力者

八十島 誠 (YASOJIMA, Makoto)  
馬 寅 (MA, Yin)