ペルーで稼働する最新の下水処理場の視察報告

野本直樹*　多川正**　荒木信夫***　大久保努**** 上村繁樹****

Introduction of the latest sewage treatment plant in Peru

Naoki NOMOTO, Tadashi TAGAWA, Nobuo ARAKI, Tsutomu OKUBO, Shigeki UEMURA

Abstract : To investigate the hygienic environment in Peru, we visited Cusco sewage treatment plant. The altitude of Cusco sewage treatment plant is 3,193 m being considered that it is one of the treatment plants installed at the highest elevation in the world. It is the newest plant in Peru and the present facility has run since 2014. The treatment type is trickling filter with PVC media. One of the features for being installed at high altitude is installing blowers to supply oxygen despite that trickling filter substantially does not need aeration. It is because of the low oxygen concentration in the air at high altitude. It should be noticed that the plant was entirely controlled by modernized and sophisticated system despite that it was built in developing country.

Key words : Peru, Cusco, sewage treatment plant, trickling filter, hygienic environment

１．はじめに

欧米諸国や日本等の先進国では、当たり前の様に衛生設備が行き届き健全な水環境が保たれている。しかし、世界には下水処理場が正常に稼働していないために河川が下水並みに汚染される地域や[1]、水上生活で生じるし尿を湖に落とす一方で、その湖の水を生活用水として利用する[2]等、非衛生的な環境で生活している人々も多く存在する。

筆者らは、その様な地域の衛生環境改善のため、途上国に適した衛生設備の技術開発を行っている[3]。設置された衛生設備が正常に稼働するためには、その地域に適した技術を用いることが重要である。そのため、技術支援を行う上で、支援先の衛生環境、経済状況、教育環境等の現状や、これまでの推移、文化を理解する必要がある[4]。そこで筆者らは、カンボジア[2]、ミャンマー[5]、ネパール[1]等、アジア諸国の衛生環境の調査を行ってきた。

しかしながら、アジア地域以外、特に中南米地域については、距離的に遠方であり、調査協力を依頼できるような中南米を支援対象とする日本の NGO もほとんどなく、今まで調査対象としては疎遠であった。

一方、ペルーは、日系人が約 10 万人存在し[6]、過去、日系人が大統領を務めたことがある等、日本とのつながりは強い。また、筆者らのグループが開発した下水処理技術 Down-flow hanging sponge（DHS）法を研究しているグループ[7]も存在する等、今後、国際共同研究の相手先となり得るポテンシャルを秘めている。

そこで、2019 年 9 月に、ペルーの衛生環境の特徴と課題に関する視察・調査を行った。その一環として、現地の最新の下水処理場の見学や聞き取り調査等を実施した。本稿では、その調査結果および文献から得られた情報をまとめて報告する。

２．ペルーについて

ペルーは、正式名称がペルー共和国であり、マチュピチュやナスカの地上絵等の有名な世界遺産を有している。南米の太平洋側北西に位置し、面積は 1,285,216 km^2 と世界 21 番目の広さを有する[8]。

ペルーは、国内で 6,000 m 以上もの高度差を有しながら、赤道直下付近の低緯度に位置しているため、多様な環境が存在する。太平洋に面した海岸地帯は、大部分が砂漠である一方で、アマゾン流域は熱帯降雨林地帯である。アンデスの山岳地帯は、熱帯降雨林から氷雪地帯まで、高度によって環境が異なる。インカ帝国の首都であったクスコは、標高約 3,400 m であり、富士山と同程度の標高でありながら、緯度が低いために比較的温暖な気候である[9]。

人口は3,133 万人、中央年齢は28.4 歳である（2018 年時点）。GDP は 4,303 億 US$（2017 年時点）[8]を有し、中進国に位置付けられている[10]。途上国よりは経済的に豊かであるものの、所得格差が大きく、また特にアンデス山岳地帯の農村部では貧困率が高い。貧しい家庭では生活費や学校に行く費用を稼ぐため、子供が仕事に従事している現状もある。2006 年時点

（2020 年 1 月 16 日受理）

*宇部工業高等専門学校　物質工学科
**香川高等専門学校　建設環境工学科
***長岡工業高等専門学校　環境都市工学科
****木更津工業高等専門学校　環境都市工学科

で、国全体として 6〜17 歳の子供のうち約 3 割が、農村部に限っては 10 人に 8 人もの子供が働いているという [1]。

GDP の内訳は、農業 8%、産業 33%、サービス業 59%である (2018 年時点)。特にペルーでは鉱業と漁業が盛んである。鉱物資源の豊富さは世界 10 位に入り、鉱業は GDP 全体の 14%を占める（2016 年時点）。太平洋に面し、12,000 もの湖やラグーンを有する等資源に恵まれているため、漁業についてはGDP 全体の 1~1.5%を占める [12]。

３．ペルーの衛生環境について

ペルーは、1980 年代後半に経済が破たん状態に陥り、上下水道に対する投資がほとんど行われなくなった。さらに、以後の人口増加に伴い、多くの地方都市で上水道普及率が低下した。下水道普及率は上水道に比べてさらに低く、半数近くの地方都市には下水処理場がなく、未処理の下水が河川等に放流されていた。

1990 年に着任したフジモリ大統領（1990〜2000 年）は、上下水道整備に着手し、ここから徐々に衛生設備の改善が進んだ。大統領府の下に、国家上下水道事業局（Programa Nacional de Agua Potable y Alcantarillado : PRONAP）、経済財政省の下に国家水道事業監督庁（Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento : SUNASS）が設立された。国家上下水道事業局の技術支援および国家水道事業監督庁の監督下で、地方政府が上下水道公社等を通じて上下水道サービスを提供する体制が確立した [13]。フジモリ大統領退任後も、衛生設備の整備は重要視されてきた。ガルシア政権（2006 年~2011 年）では「Agua para Todos（万人に水を）」プログラムが実施され、クチンスキー政権（2016 年~2018 年）が定めた国家上下水道計画(2017~2021 年)では、2021 年に都市部で下水道普及率 100%、下水処理率 100%と、高い目標が掲げられた [14]。

この様な取組みにより、ペルーの衛生環境は改善されつつある。例えば、2003 年時点で、国内の排水処理量は全体の 21%であったが、2012 年時点では 32%まで改善されている。2003 年から 2013 年の間で、下痢を患う 5 歳以下の子どもは、693,000 人から 225,000 人へ減少した [15]。

一方で、253 の地域のうち、89 地域で下水処理が行われておらず、下水が未処理のまま水環境に垂れ流されている。この 89 の地域では、2013 年時点で、1,888,000 人分の 298,000 m^3/day の未処理下水が放流されており、これは水量基準で国全体の 12%に相当する。特に首都リマ以外の地域については、360 万人（全人口の 12%）以上の住民の下水が十分に処理されておらず、このうち少なくとも 190 万人分（同 6%）については下水処理場自体がない [16]。衛生施設を利用できる人口は、都市部で 81%、地方で 50%と都市部では整備が進みつつあるものの、地方には十分にいきわたっていない [15]。

河川の水質については、159 の流域のうち、98 か所で水質のモニタリングがなされており、そのうち 40%は水質基準を超過している。水質汚濁の主な要因は、排水処理設備の不足、産業及び鉱業排水の流入、農薬の使用などである。水の用途は、農業が 87.7%と大部分を占め、家庭が 9.9%、鉱業が 1.5%、製造業が 0.9%である。環境汚染がもたらす被害損額は、GDP の 4%と見積もられており、そのうち 70%は飲料水媒介の病気や大気汚染を原因とする健康への影響である。鉱業活動からの水質汚濁も GDP の中の 0.4〜0.7%の間で寄与している [15]。

ペルー国内には 163 箇所の下水処理場があり、そのうち 127 箇所は嫌気式もしくは通性のラグーン方式（78%）であり、省エネルギー型の下水処理技術が主流となっている。先進国で多く使われている活性汚泥法は 10 箇所 (6%) である。[16]。

下水処理場で発生する汚泥の処分場は、ペルー国内で 2 か所しかない。このため、クスコでは汚泥が河川に廃棄されるという本末転倒な問題が生じている [13]。また、この様な不適切な廃棄処分は、住民の間でも行われている。丘陵地帯はごみの収集頻度が少ないため、下水道やマンホールにごみが投入され、その結果、下水管の詰まりを招いている [14]。

下水処理場の放流先として最も多いのは灌漑利用で 63 か所である。自然環境へは 49 か所から放流される。このうち河川に放流されるのは 1 か所と、非常に少なく、大半は湖 (37 か所）が最終的な放流先となっている。41 か所は、放流水が乾燥地や地下への浸透している。10 か所については、安定化池の中やセプティックタンクの出口において、地下への浸透や蒸発による消失等、乾燥地帯特有の傾向を示している [16]。

４．ペルーの最新の下水処理場

4.1　下水処理施設

本調査では、2019 年 9 月 14 日に、ペルー国内で最新の下水処理場であるクスコ下水処理場（Planta de tratamiento de agua nesidual de San Jeronimo-Cusco）を訪問し、アルマロ・フローレス所長をはじめとする現場の従業員の方に対し、聞き取り調査を行った。

クスコ下水処理場は、3,193 m もの標高に位置し、筆者らの知る限り、世界で最も標高の高いところに建設された下水処理場の一つである。1983 年より稼働しており、クスコ市内唯一の下水処理場である。聞き取り調査によると、当初は、散水ろ床装置を本処理として、後段に沈殿槽を設けた簡素なシステムであった。散水ろ床装置の保持汚泥担体は石であった。その後、ペルーの地方都市における上下水道施設を改善するため、2000 年にペルーと日本との間で借款事業契約が結ばれた。この「地方都市上下水道整備事業（II）」により、クスコ下水処理場の増設・改修工事が行われ、2014 年より現在の施設が稼働している [13]。

図１　散水ろ床装置（a）全体（b）散水の様子（c）担体（d）送風機と空気窓（e）ろ床内の様子

現設備の設計流量は 800 L/s、最大流量は 950 L/s であり、下水処理工程は以下の通りである。まずスクリーン、沈殿槽等の前処理で、固形成分の除去を行う。上澄みは散水ろ床装置（図 1）に送られ、生物学的に有機物等が除去される。処理水は最終沈殿槽で固液分離され、上澄みを塩素処理して放流される。また余剰汚泥を処理する嫌気性消化槽も付随している。

中央制御室で各電動機器を操作し、各種センサーの検出値を確認することができる（図 2）。センサーを使用した自動制御も導入し、近代的なシステムとなっている。例えば、設備を保護するために、流入水の濁度が 630 NTU 以上、あるいは pH が 12 以上である時は、下水の流入を遮断し、バイパスして河川に放流する制御を設けている。その一方で、旧設備の沈殿槽を有効活用していることや、高低差を利用してポンプの電力消費を抑制する等、経済面も配慮されている。

各装置の詳細について、沈殿槽は直径 28 m と 42 m の槽が 1 基ずつである。最終沈殿槽は直径 36 m の槽が 2 基である。散水ろ床装置は、前段に 3 基、後段に 2 基設け、前段と後段の間に旧設備の沈殿槽を経由する二段ろ床法を採用している。前段は直径 32 m、後段は直径 22 m、それぞれ高さ 4 m の円筒型の反応槽の中に、ハニカム状の PVC 製保持汚泥担体（図 1（c））が充填されている。前段の水量負荷は 29 $m^3/m^2/day$ であり、一般的な二段ろ床法（9.35～37.4 $m^3/m^2/day$）[17] と同等である。反応槽の有効容量を 8 割として、設計流量を元に水理学的滞留時間（HRT）を計算すると、前段の 3 基分は 2.7 時間、後段の 2 基分は 0.84 時間である。散水ろ床法の一種 DHS 法の設計 HRT は 0.95～2.5 時間であり [18]、それぞれ同等の値である。他方、聞き取り調査によると、1 基当たりの実測の 1 基当たりの HRT は、前段が 45 秒、後段が 30 秒であることから、それぞれ理論値の 1.4%、2.0%程度の滞留時間となっている。散水ろ床装置は、通常酸素供給のための動力が不要である。しかし、標高が高く、空気中の酸素濃度が低いために、装置の下部に送風機と空気窓が設置されている。散水ろ床装置 1 基あたり 8 台の送風機が設置されている（図 1（d））。送風機は、外気温とリアクター内の気温との差が 2 ℃以上になった時に運転する様制御されている。空気窓は通常は閉められている（図 1（d））。

最後の塩素処理は、滞留時間が 40 分間であり、放流水の残留塩素濃度が 0.1 mg/L 以上維持する様に基準が設けられている。1 週間あたり 2,000 kg の塩素ガスを使用している。

沈殿槽で分離した汚泥は、消化、脱水後に産業廃棄物として処分される。消化槽（図 3）は、37～38℃、pH 7.2 となる様に管理され、HRT 20 日間で運転されている。消化ガスは 4,000 m^3/day 発生し、そのうち 20%は消化槽の加温に使用さ

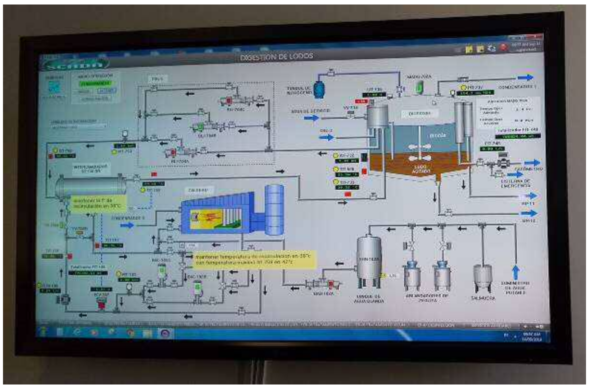

図２　中央制御室のモニタリング画面

図３　消化槽

図４　オゾン発生装置

図５　河川へ放流される処理水

れている。

本下水処理場では、建設された設備を正常に稼働しているだけでは無く、改善活動も積極的にされている。周辺住民から異臭について苦情が生じた際は、調査チームを結成して対応した。この時、臭気対策として硫化水素吸収塔やオゾン発生装置（図 4）を導入し、有効な対策を講じている。また、消化槽で発生した消化ガスの 80%は、これまで焼却処分されてきた。今後、消化ガス中に含まれるメタンガスを有効活用するため、現在発電設備の導入が進められている。消化された汚泥については、これまでは有効利用されずに産業廃棄物として処分していたが、2018 年に法律が改正され、汚泥を肥料として使用できる様になったため、現在、汚泥を肥料として使用するためのプロジェクトが進行中である。

クスコでは、地方都市上下水道整備事業（II）実施以前は、下水道普及率が低く、下水処理場も能力不足であった。そのため、放流先のワタナイ川の水質汚濁は深刻であり、灌漑による農業への影響も懸念されていた。本事業により、下水道普及率は 46%（1998 年）から 80%（2015 年）に大幅に改善された [13]。聞き取り調査によると、現在はクスコ市内の 87%の水量を処理している。ペルー国内の衛生施設へのアクセス率は、人口基準で 76.2%（2015 年時点）[8] であることから、ペルー国内では比較的普及は進んでいる。しかし、未処理のまま河川へ放流されている下水も残っているため、ワタナイ川の BOD は約 150 mg/L と希薄な下水並みの数値を示し [13]、水質汚濁の原因となっている。フローレス所長も、未処理下水が水環境に放流されることについては、課題と認識していた。

下水処理場の現在の処理性能について、聞き取り調査では、流入水 BOD が 400 mg/L に対し、流出水は 30～17 mg/L と、放流基準（100 mg/L）を満たしているとのことであった。しかしながら、散水ろ床装置の滞留時間は、上述した様に 1 分間にも満たず、ほぼ素通りである。そのため、外観上は十分な処理ができていない様に見えた（図 5）。筆者らが研究を継続している下水処理技術 DHS 法は、同様に散水ろ床型であり、保持汚泥担体としてスポンジを用いている。実測 HRT と理論 HRT との比は 67%であり [19]、本処理場の 48 倍である。処理水質を向上するために、担体をスポンジに変更し、反応槽内における実質の滞留時間を改善することが、一つの対策法として挙げられる。

4.2　下水処理設備の運営について

聞き取り調査によると、下水処理場の運営費として、年間 350,000US$の予算が割り当てられているという。設備更新や改善のため、別途 10 年間で 1200,000US$の予算もある。上述した発電設備の更新は、本予算を利用している。

クスコ市では、下水の利用料金を、5 種に分類している。①家庭、②商業 1（ホテルなら 20 床以上、事務所なら 20 以上の机）、③商業 2（商業 1 以下の規模）、④公共施設（裁判所、政府等）、⑤工業の中で、集め口数で①の割合が 86%と大半を占めている。下水料金の回収率は 98%である。家庭での 1 ヶ月の上下水利用料金は、0～19 m^3 の間では利用水量にかかわらず 30～50 sol（1sol＝32.9 円 [20]）である。20 m^3 以上になると、1 m^3 毎に 2.5 sol 追加される。②～⑤については、3,000～5,000 sol と、①の約 100 倍の料金を徴収しており、これだけで下水処理場の運営費を賄える。企業等から料金を徴収して、貧しい家庭にも水を供給することが、ペルーの思想である。

５．おわりに

本調査を通して、本下水処理場ではスタッフが実直に日々の運転や設備の改善に取り組んでいることが印象的であった。筆者らは、途上国の一つであるインドの下水処理場の調査を行ったことがあるが [21]、ほとんどの下水処理場で運転管理が不十分であり、適切な管理がなされていなかった。衛生設備の整備が進んでも、それを管理する人材がいなければ、環境改善にはつながらない。インドに比べ、ペルーでは人的資源は備わっていると感じられたことから、先進国からの技術の継承と設備の普及が進めば、衛生環境が大きく改善される可能性が示唆された。ペルー政府も衛生環境の改善に非常に前向きであることも追い風になると考えられる。

一方で、聞き取り調査によると、小学生向けの環境教育は一切なされていないとのことであった。上述の様な河川への汚泥の廃棄や、下水道へのごみの廃棄が生じる要因の一つとして、水環境の保全への理解不足が挙げられる。今後ますます普及が進むと期待される衛生設備の効果を十分に発揮するためには、衛生管理に関わる人材はもちろん、一般の市民への理解を得るための環境教育、とくに若年層向けの教育が重要になると考えられる [22]。

謝辞

本調査にご協力いただきましたクスコ下水処理場の皆様に御礼申し上げます。本調査は、JSPS 科研費基盤研究（B）「開発途上国における水・廃棄物問題改善のための包括的都市衛生政策の構築」（研究代表者：上村繁樹）により遂行しまし

た。ここに記して関係各位に謝辞と致します。

参考文献

1) 野本直樹, 多川正, 荒木信夫, 大久保努, 上村繁樹：バグマティ川の水質から見たカトマンズの下水処理場の整備の現状. 用水と廃水, 61(12), 865-873, 2019.
2) 野本直樹, 大久保努, 上村繁樹：カンボジア シェムリアップ州における衛生環境調査, 宇部工業高等専門学校研究報告, 64, 6-12, 2018.
3) Okubo T., Kubota K., Yamaguchi T., Uemura S., Harada H: Development of a new non-aeration-based sewage treatment technology: Performance evaluation of a full-scale down-flow hanging sponge reactor employing third-generation sponge carriers, Water Research, 102, 138-146, 2016.
4) 上村繁樹, 大久保努, 多川正, 大野翔平, 荒木信夫:ごみはいつまでもごみじゃない―ある途上国農村における地域密着型ごみマネジメントの実践例―, 廃棄物資源循環学会誌, 28(4), 303-312, 2017.
5) 上村繁樹, 大久保努, 多川正, 荒木信夫：ミャンマー・インレー湖の水上居住者の暮らしと衛生環境, 用水と廃水, 60(6), 432-439, 2018.
6) 外務省： https://www.mofa.go.jp/mofaj/area/peru/data.html （2019 年 12 月 24 日）
7) Yaya Beas R. E., Kujawa-Roeleveld K., van Lier J. B., Zeeman G.：A downflow hanging sponge (DHS) reactor for faecal coliform removal from an upflow anaerobic sludge blanket (UASB) effluent, Water Science & Technology, 72(11), 2034-2044, 2015.
8) Central Intelligence Agency (CIA) : The world fact book, https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/pe.html （2019年12月24日）
9) 細谷広美：ペルーを知るための 66 章（第 2 版）, 明石書店, 2012.
10) 国際協力機構（JICA）： https://www.jica.go.jp/activities/schemes/finance_co/about/standard/class2011.html （2019 年 12 月 24 日）
11) 杉本均, 櫻井里穂, 工藤瞳：児童労働と義務教育：メキシコおよびペルーの事例より, 京都大学大学院教育学研究科紀要, 55, 15-39, 2009.
12) OECD：Responsible Business Conduct Country Fact Sheet, 2019.
13) 国際協力機構（JICA）： 2015 年度 外部事後評価報告書 円借款「地方都市上下水道整備事業（II）」, 2015.
14) 国際協力機構（JICA）： 2017 年度 外部事後評価報告書 円借款「リマ首都圏北部上下水道最適化事業（I）」, 2017.
15) United Nations : Environmental Performance Reviews PERU Highlights and recommendations 2016, 2016.
16) SUNASS：Diagnosis of wastewater treatment plants in the field of operation of the entities that provide sanitation services, 2015.
17) 松尾友矩：水質環境工学 下水の処理・処分・再利用, 技報堂出版株式会社, 1993.
18) Hatamoto M., Okubo T., Kubota K., Yamaguchi T.：Characterization of downflow hanging sponge reactors with regard to structure, process function, and microbial community compositions, Applied Microbiology and Biotechnology, 102(24), 10345–10352, 2018.
19) 大久保努, 高橋優信, 久保田健吾, 原田秀樹, 時田政輝, 上村繁樹, 前野一夫：途上国のための新規下水処理装置“DHS”におけるスポンジ担体の水の流れと酸素の取込特性の評価, 実験力学, 15(1), 30-37, 2015.
20) Yahoo! ファイナンス：https://m.finance.yahoo.co.jp/stock?code=PENJPY=X （2019 年 12 月 24 日）
21) Maharjan N., Nomoto N., Tagawa T., Okubo T., Uemura S., Khalil N., Hatamoto M., Yamaguchi T., Harada H.：Assessment of UASB–DHS technology for sewage treatment: a comparative study from a sustainability perspective, Environmental technology, 40(21), 2825-2832, 2019.
22) 大久保努，上村繁樹：カンボジアでの水環境教育の実践, AQUA BOOK, 4(2), 3-4, 2019.