

バンドン市のスラム地区における 生活排水の現地調査

FIELD RESEARCH ON DOMESTIC WASTEWATER FROM THE SLUMS IN BANDUNG CITY

牛島健¹・入江光輝²・Neni SINTAWARDANI³・Jovita TURIASTUTI³・石川忠晴⁴
Ken USHIJIMA, Mitsuteru IRIE, Neni SINTAWAEDANI, Jovita TURIASTUTI
and Tadaharu ISHIKAWA

¹学生員 東京都立農業高等学校定時制教諭 (〒183-0056 東京都府中市寿町1-11)

工修 東京工業大学大学院総合理工学研究科

²正会員 工博 東京工業大学 総合理工学研究科 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259 G5-2F)

³Research Centre for Physics, Indonesian Institute of Sciences

⁴フェロー 工博 東京工業大学教授 総合理工学研究科 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259 G5-2F)

Many metropolises in developing countries have the slums where water environment and sanitary condition is a severe problem because of untreated waste water. In this study, a field research on the water use and effluent was carried out in the slums of Bandung City in Indonesia as the first step for planning the rehabilitation of the water environment: The water use was surveyed by interviews at 62 residences, the amount and quality of domestic waste water was measured at two families, and the flow rate and water quality was measured in a effluent channel flowing through the slums. Integrating analysis lead to the following conclusions: The average water use is about 100 liters/person/day, in which the water use at toilet takes 40%. About 90% of PO4-P and 70% of COD are discharged from toilets.

Key Words : Domestic waste water, slum, sanitation system, developing country.

1. はじめに

アジアの発展途上国には、過剰な人口の集中と排水処理設備の立ち遅れにより、水環境が極度に悪化している都市が多数存在する^{1),2)}。特に未処理尿尿の流出による河川水質、地下水質の悪化は、水利用上および衛生上の問題を深刻化している³⁾。本研究で対象とするインドネシア国のバンドン市もその一つである。

このような地域の水環境改善における焦点の一つがスラムである。スラムは集団性・結合性の高い過密不良住宅地区の総称で、その形態は国ごと地域ごとにさまざまだが、貧困階級が多く居住し生活基盤が劣っている点は共通している。アジアの都市人口の40%余りがスラム居住者であるとも言われている⁴⁾。

スラム地区の水環境改善にあたっては、そこでの水利用・水循環の仕組みを把握することが重要となる。というのは、スラムの多くが行政の枠外で自然的に発生しており、独特の共同的生活スタイルを有し、また必要に迫

られた自前のインフラなどが存在することもあるからである。

著者らは、インドネシア国バンドン市のスラム地区をフィールドとして、水環境改善のための屎尿処理のあり方について共同研究を進めている。本論文では同市の代表的スラムであるキアラチョンドン地区における水利用、生活排水および河川水質の関係を実態調査した結果をとりまとめ、考察を加えた。

2. 調査地区の概要

バンドン市はインドネシア第4の都市で、人口は250万である。ジャワ島の西端に近い内陸部にあり、首都ジャカルタの水源でもあるチタルン川の上流に位置する(図-1(a))。したがってバンドン市での水質汚濁はジャカルタにも影響を及ぼす。

市の北半分は富裕層の住宅、公共施設および保養地が広がり、南半分は比較的貧困な人々の居住区となってい

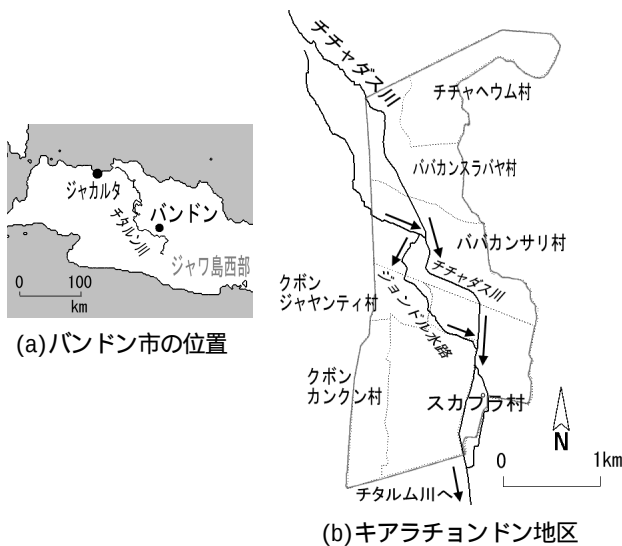


図-1 調査地区の地図

る。バンドン市から排出される汚水の一部は、郊外にある処理場で処理されている。ここに接続される下水道の普及率は16%であり、他には大規模な水処理施設は存在しない。

本研究の対象であるキアラチョンドン地区は、市中心部のやや東南に位置し、面積は6.1km²、人口11.6万人、人口密度は1.9万人/km²である。同地区は図-1(b)に示す6つの村(Kelurahan)で構成され、各々の村が11～18の住区(Rukun Warga)に分けられ、その下に10前後の小住区(Rukun Tetangga)が置かれている。

キアラチョンドン地区の中央には、チタルン川の支流であるチチャダス川が北から南に流れている。チチャダス川の支川が本川に流入する前に分岐してジョンドルと呼ばれる水路に入り、スラム街を貫流してチチャダス川本川に注いでいる。ジョンドル水路にはスラムからの尿や生活排水が流れ込み、乾季には生下水に近い状態となっている。したがって、この水路の水質および流量を計測することにより、スラムからの汚濁負荷を定量的に把握しやすいと考え、本研究ではジョンドル水路流域を研究対象地区とした。

3. 事前の聞き取り調査

現地観測を行う前に、同地区の水循環の概略を把握する目的で、水路近傍の62世帯に聞き取り調査を実施した。対象世帯は全て同水路下流部沿いのスカブラ村02住区に属している。この住区には著者らの知人が居住していることから、住民の協力を得やすく、また安全に調査を進めることができた。主な調査項目は、
 ．水の入手方法、
 ．水の用途および各水量、
 ．トイレの形式、
 ．一部の用途の使用時間帯、
 ．排水経路である。

調査項目を整理した用紙を持った調査員が対話形式で回答を記入するとともに、可能な場合は実態を観察した。

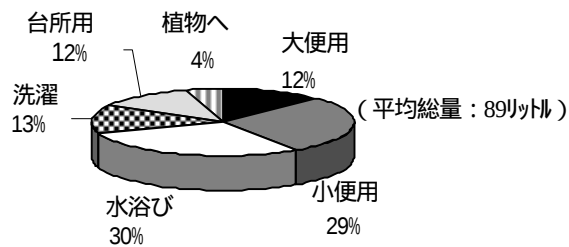


図-2 用途別水使用量

ただし、
 ．に対しては、バケツまたはタンクの個数相当で答えてもらい、後に水量に換算した。おおよび
 ．への回答は当然回答者の感覚によっており、有効数字は一桁程度と思われる。事前調査の目的は、後に述べる現地計測が限られたケースしか行えないことから、地区の平均的状況と現地調査の結果に大きな齟齬がないかどうかを確認することであった。

(1) 水使用に関する結果

行政統計によればスカブラ村02住区の上水道普及率は21%である。上水道を持たない家庭は「有料共同蛇口」から水を得ている。有料共同蛇口とは、個人の所有する上水道蛇口をコミュニティに有料で開放しているもので、利用者は所有者個人に使用量を支払い、所有者が水道企業体に全使用分の料金を支払う。このような蛇口は概ね1小住区にひとつある。共同有料蛇口を使用した「水売り」もいる。蛇口所有者と契約して通常より安い値段で水道水を購入し、20リットルのタンクに詰め、カートに乗せて売り歩く。水売りから水を購入している家庭も多い。同地区には数世帯が共同で使用する井戸もあったが、鉄分が多く、また基準値を大幅に超える大腸菌が検出されることもあるので⁵⁾、住民も井戸水を飲用に用いることはないとのことであった。ちなみに、有料共同蛇口の水の値段は個別売りで20リットルあたり250ルピア(90ルピアが1円程度)、月契約で5000ルピア/人月であった。

口述筆記に基づき使用水量を計算した結果を図-2に示す。一人一日あたりの総使用量の平均は89リットル/人日で、内訳中の最大は「トイレ」であった。小便および大便を排泄した後に流す水量が全使用量の各29%と12%、合計で41%を占めている。続いて「水浴び(30%)」、「洗濯(13%)」、「台所用(12%)」となっている。トイレ用水の占める割合が高いことは、フィリピン国マニラ市のスラムで著者らが過去に行った調査の結果と類似している⁶⁾。図-3に、時間を比較的特定しやすい3用途(大便、水浴び、洗濯)についての、使用時間に関する回答をまとめたものを示す。図-2からわかるように、これらの水量は全体の55%に相当する。その他の用途は時間的に分散しており、明確な回答は得られなかった。

(2) トイレの形態と使用方法

自宅にトイレを持っていると答えた世帯は全体の87%で、残りは共同トイレを利用していた。インドネシアの

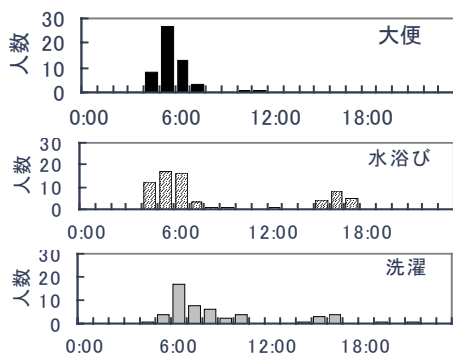


図-3 大便、水浴び、洗濯の水使用時間帯



写真-1 家庭用トイレ



写真-2 共同トイレ

標準的な家庭用トイレについては既にいくつかの報告があるが⁷⁾、本調査地区でもほぼ同様であった。すなわち、しゃがむタイプの便器(写真-1)で、使用後にはバケツなどに汲み置きした水を手桶にすくって流す。また排泄後に尻を洗う水も同様である。なお多くの家庭ではトイレと水浴び場が兼用となっている。

トイレおよび水浴びで使用した水の始末は、53%が「無処理排水」、47%が「セプティックタンク」であった。ただし、セプティックタンクは、著者が調査した範囲では、いずれもコンクリート製の貯留槽に流し込んだ後オーバーフローして排水路に流出させるもので、浄化能力はかなり低いものと思われた。なお、トイレ以外の排水は全て無処理で放流されている。放流先は「水路(15%)」と「側溝(85%)」だが、経路を追跡した結果、最終的には全てジョンドル水路に入ることがわかった。側溝は、道路沿いとは限らず、建物の間の僅かな隙間や、床下を通っているものもあった。目視できた限り、塵埃・汚泥が堆積して水が澱んでいる場所が多かった。

一方、共同トイレは、写真-2に示すように全てジョンドル水路または側溝の際にあり、汚水は直接水路に流入する構造であった。利用者はほとんど全て地域住民であり、設置者は地方自治体の場合もあるが、住民自身である場合もあった。内部はコンクリートの床に穴を穿ち便器を埋め込んだもので、便器は使用者が毎流水を流すために比較的きれいであった。

4. 現地観測の方法

スラムにおける水収支および汚染物質の収支を検討するために、2004年8月と2005年9月に家庭排水口での直接計測を、2005年9月にジョンドル水路での計測をそれぞれ行い、両者を比較した。ジョンドル水路の計測対象流域には工場などは存在しない。このため、流水は、生活排水、降雨などの自然排水、後述する礼拝のための洗浄水が主な成分と考えられる。本研究では、家庭排水計測と水路計測の結果を比較しやすいように、自然排水が最も少ない乾季の末期に実施した。また礼拝の

ための水使用については2005年3月に別途調査した。

(1) 生活排水の計測

a) 計測方法

4人家庭(大人2人、子供2人)と単身家庭(老婆)の2世帯について計測を行った。どちらの家もジョンドル水路の際にあり、水路に突き出たパイプから直接排水されている。なお、前者は上水道を自宅に持っていた。

前者については2004年8月11日11:00からの24時間、後者については2005年9月1日10:00からの24時間に計測した。排水パイプの下水路に大型のバケツを設置し、1時間ごとに水量を計測した。また2004年(4人家庭)には、24回の採水を水量に比例して混合し、一日平均の水質をポータブル水質計(共立理化学研究所製：ラムダ-8022)で分析した。24時間平均で計測した理由は水質変動が(恐らくトイレ使用により)著しく大きいと予想されたためである。また2005年(単身家庭)には、一応24回の採水分析を行ったが、やはり変動が顕著であったため、後の検討では、水量による重み付き平均値を用いている。

分析項目は $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、CODである。分析方法は、 $\text{NH}_4\text{-N}$ についてはインドフェノール法、 $\text{NO}_2\text{-N}$ についてはナフチルエチレンジアミン法、 $\text{NO}_3\text{-N}$ については還元とナフチルエチレンジアミン法、 $\text{PO}_4\text{-P}$ についてはモリブデン青法、CODについてはアルカリ性過マンガン酸カリ法である。本計測法は基本的に溶存態のみを計測するものである。本来は固形物も含めて計測したいのだが、スラムの中で昼夜を通して計測するためにやむを得なかった。装置の使用マニュアルに従い、静置して上澄み液を採取し分析した。なお、固形物の中で特に重要と思われる人糞については考察の章で触れる。

b) 計測結果

図-4に家庭排水量の計測結果を一人当りの量で示す。単身家庭では排水量が時間的に不安定であり、流出波形は両家庭で必ずしも同一でないが、早朝、正午および夕方から晩の使用量が多い点は共通している。4人家庭で深夜に鋭いピークが生じているのは、たまたまこの日にオートバイを洗ったためである。

一日の水使用量の総計は、4人家庭で124.5リットル/人日、

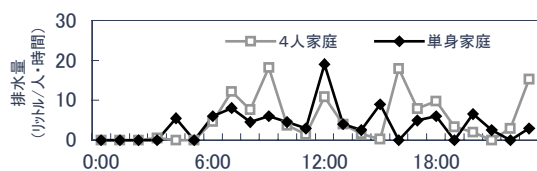


図-4 家庭排水量の計測結果の時系列

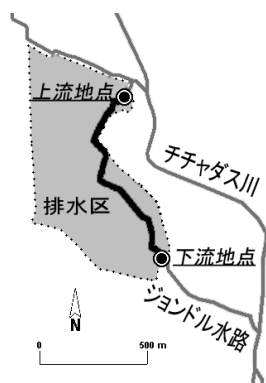


図-5 水路での観測地点

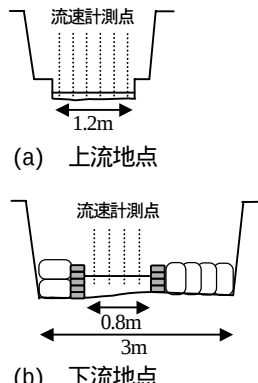


図-6 観測地点の断面形状

老人の単身家庭で95.0リットル/人日である。ただし前述のオートバイ洗浄の分を差し引くと前者は111.1リットル/人日となる。一方、3(1)に述べた聞き取り調査の結果では、一人一日あたりの水使用量は89リットル/人日であった。聞き取り調査の精度は必ずしも明確ではないが、上述の単身家庭の結果も含めて考えると、調査した4人家庭の水使用量は、標準よりやや大きい可能性もある。この原因として、この家庭が上水道を有しているため、気軽に水を使用できる環境にあることが考えられる。しかし上記の3つの数値、すなわち聞き取り調査の平均値(89リットル/人日)、4人家庭の計測値からオートバイ洗浄水を引いた値(111.1リットル/人日)、単身世帯での計測値(95.0リットル/人日)は概ね一致しており、概数として100リットル/人日と考えてよいと思われる。

一日の平均水質を表-1に示す。単身家庭については24回の計測の最大値と最小値も記している。なお、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は $\text{NH}_4\text{-N}$ に比べて1オーダー以上小さかったので、ここでは省略している。全般に単身家庭の排水の水質値が高くなっている。これは、排水量が少ないことにもよっているが、後の考察で述べるように汚濁物総量も大きくなっている。これについては5章で考察する。

(2) 水路での計測

a) 計測方法

図-5に示す2地点において、2005年8月31日～9月2日にかけて流量観測を実施した。2地点の区間距離は960mである。排水系統の現地踏査結果と地区行政データの比較から、両地点間の排水区面積は0.41 km^2 、世帯数は3,585、人口は16,240と推定された。なお、前述の家庭排水調査を実施した世帯は、この区域内にある。

両地点に水位計(ウイジン製:UIZ-WL100)を設置し10

表-1 家庭排水の平均水質(mg/l)

	4人家庭	単身家庭
$\text{NH}_4\text{-N}$	12.5	83.1 (1.6 - 439.0)
$\text{PO}_4\text{-P}$	17.42	64.50 (7.74 - 276.50)
COD	203.1	377.5 (103.3 - 1503.5)

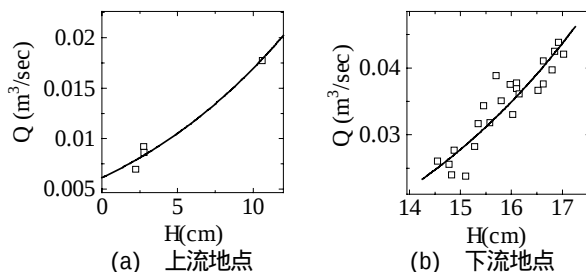


図-7 水理流量曲線

分ごとに水位を記録した。また電磁流速計(アレック電子製:ACM-100D)を用いて随時流量観測を行い、両者の比較から水位流量曲線(図-7(a)、(b))を作成し流量の時系列を求めた。観測時の両地点の断面形と計測測線を図-6(a)、(b)に示す。なお、下流地点では水深が小さかったので、図-6(b)に示すように土壌で断面を狭めて計測している。上述の観測期間の内、9月1日10時から24時間で1時間おきに河川水を採取し、家庭排水の項で述べたものと同じ方法で水質分析を行った。

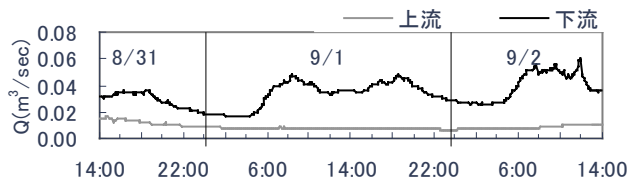
b) 計測結果

上下流2地点の流量時系列および両者の差を図-8(a)、(b)にそれぞれ示す。9:00および18:00に明確なピークを持つ日変動が見て取れる。図-9には $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ およびCODの濃度時系列を示す。スラムを通過することにより、下流川の濃度はいずれも増加している。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は深夜から早朝の数時間に低下するが、他の時間帯は高レベルを保っている。一方CODは深夜から午前10:00頃まで低レベルにあり、その後増加し午後から深夜まで高レベルを保っている。これらの時間変化は、図-3に示した一部用途の時間的偏りによっていると思われる。

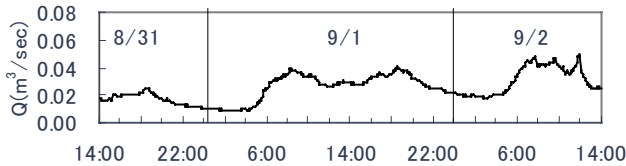
5. 考察

(1) 水量の収支

水質汚濁の収支を解析するにあたり、水量収支が正確に把握されていなければならない。そこでまず家庭からの排水量と河川流量の対応を調べた。総括結果を表-2に示す。図-8(b)に示した流量グラフから、水質観測を行った一日の総流入量を求めると表-2の(1)となる。一方、先に求めた家庭排水量に排水区の人口を乗じると、(3)a～dに示す値となり、オーダーは一致するがやや小さい。ところで河川には自然排水の分も含まれるが、仮にそれが観測期間の最低流量(9月1日の早朝:約0.008



(a) 上下流地点の流量時系列



(b) 上下流地点の流量時系列の差

図-8 水路の流量時系列

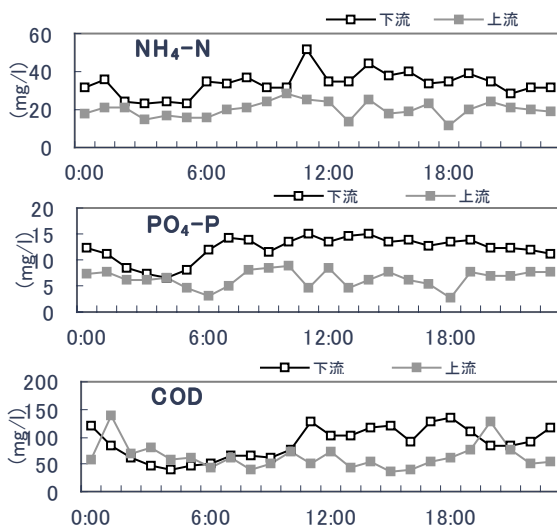


図-9 水路の水質分析結果の時系列

$\text{m}^3/\text{秒}$)であると仮定して、これを差し引いて一日の総流量を計算すると(2)となり、家庭排水量に近い値となる。しかし図-9に示したように、最小流量時にも $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は比較的高いことから、実際の自然排水は、この値よりやや小さい可能性もある。

ところで、研究対象区域の住民の97%はイスラム教徒であり、1日5回の礼拝を行うが、その前に必ず顔と手足を洗う。前述の聞き取り調査ではこの水量は含まれていなかったが、礼拝の回数が多いことから、無視できない可能性がある。そこで2005年の3月30日10:00からの24時間に、地区内のモスクの蛇口にメータを取り付けるとともに、礼拝に訪れた人数を数えることにより、一人一回あたりの水使用量を推定したところ、4.7リットル/人回という数値を得た。この数値に礼拝回数(一日5回)と排水区イスラム教徒人口(15,753人)を乗じると、370 $\text{m}^3/\text{日}$ となる。礼拝はモスクで行う場合と自宅または職場などの外出先で行う場合があるが、いずれにしても事前調査では調査項目に入れていなかったため、表-2の(3)a欄の数値にこれを加えると(4)に示す数値となり、河川での観測結果と概ね整合する。なお、実際に計測した2家庭の数値(3)-b、cでは、家で礼拝を行った際の排水が部分的に含まれている可能性がある。実際、(3)-b、

表-2 水量の収支

	$\text{m}^3/\text{日}$
(1) 水路での流量増加分	2581
(2) (1) - (最低流量)	1856
(3) 家庭排水 × 排水区人口	
a 聞き取り調査	1445
b 4人家庭	1804
c 単身家庭	1543
d 代表値 (100リットル/人日)	1624
(4) (3)a + 礼拝用水	1815

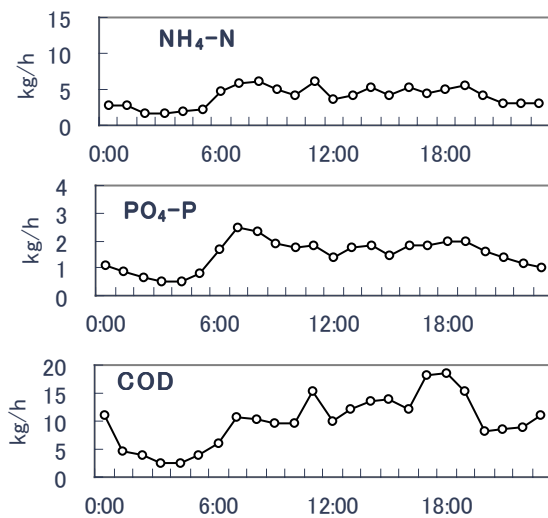


図-10 水路内フラックス増分の時系列

cの数値は、(3)-aと(4)の間にある。

(2) 汚濁物の収支

上流地点と下流地点において、計測された一時間ごとの濃度と流量を乗じてフラックスを各々求めた後に、下流の値から上流の値を差し引き観測区間でのフラックス増分を求めた。この結果を図-10に示す。図-9に示した濃度波形と同様に、 $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{PO}_4\text{-P}$ は早朝から増加し、CODは比較的ゆっくり増加し夕方にピークを持っている。

図-10の結果を一日間で積分し居住人口で除し、住民一人あたりの負荷を算定すると、表-3の(1)となる。また同表の(2)は家庭排水の一人あたり計測値である。単身家庭に比べて4人家庭の値が全て少なめに出ているが、この理由は、単身家庭の老婆が一日在宅していたのに対し、4人家庭では主人と子供2人が各々職場と学校に行ったためであると考えられる。その欠損分は他の場所で汚濁負荷となっている可能性が高い。そこで仮に単身家庭での計測値(2)-bを一人あたりの発生総量として $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、CODの水路への負荷量(1)との比を取り流達率を概算すると、それぞれ0.7、0.4、0.4となる。

さて、図-2に示した調査結果では、水使用量の41%がトイレであった。したがって、上述の汚濁負荷について

表-3 住民一人あたりの負荷量の比較

	NH ₄ -N (g/人日)	PO ₄ -P (g/人日)	COD (g/人日)
(1)水路での負荷量増加分	5.90	2.18	14.86
(2)家庭排水			
a. 4人家庭	1.55	2.17	25.32
b. 単身家庭	7.89	6.13	35.86
(3)尿尿による負荷量			
a. 尿	2.49	5.5	17.5
b. 尿	0.15	0.58	28.7

表-4 尿尿の成分および一人一日あたりの負荷量(Almeidaら⁸⁾)

	NH ₄ -N	PO ₄ -P	COD
a. 尿(mg/l)	2.49	5.5	17.5
b. 尿(mg/g)	1.5	5.8	287

もかなりの部分がトイレに由来するものと思われる。そこでAlmeidaら⁸⁾がまとめた尿尿の成分分析結果を用いて尿尿による負荷を概算し、上述の観測結果と比較する。彼らの分析値を表-4に示す。一方、尿と尿の一人あたり排泄量は国や人種によって異なるものの、概ねそれぞれ1000～1500リットル/人日、100～150g/人日である⁹⁾。インドネシア人は一般に小柄であり、また調査地区居住者が貧困層であることから、ここでは下限値を仮定すると、一人あたりの尿尿による負荷量は表-3の(3)となる。

本研究の家庭排水分析では固形物を除いているので尿は含まれていない。そこで、単身家庭の排水分析の値(表-3の(2)-b)と一人あたりの尿の負荷(表-3の(3)-a)を比較すると、NH₄-Nでは32%、PO₄-Pでは90%、CODでは49%となる。これに対して、計測されていない尿の値を加えた上で尿尿の負荷の占める割合を計算すると、NH₄-Nでは33%、PO₄-Pでは91%と大きく変わらないが、CODは72%となる。今回の現地計測はケースが限られており、またAlmeidaらの分析対象と環境が同じとは言えないので、上記はあくまで参考値である。しかし、水使用の内訳と併せて考えると、水汚染における尿尿の比率はかなり高いものと考えられる。

6. まとめ

バンドン市の代表的スラムであるキアラチョンドン地区の水使用と排水の実態について、聞き込み調査および現地計測を行った。その結果、家庭排水の直接計測結果と排水路における観測の結果は、水量および水質フラックスにおいて概ね整合していた。また、既存の尿尿特性に関する文献値との比較から、水質フラックスの多くが尿尿由来であると推測された。

スラム地区は一般に人口過密で土地が狭小であり、下水道を敷設することは物理的・経済的に困難であると思われる。また、スラムは、貧困が解消されるまでの仮設住宅群的な性格もあるため、下水道のような恒久的なシステムの導入が妥当かという点にも疑問が残る。

そこで、個別・自己完結型の排水処理システムの導入が期待されるが、個別浄化槽のように汚濁物の一部を最終的には水系に放出する方法は、単位面積負荷の大きいスラム地区では、余程丁寧な管理をしない限り根本的な問題解決にならない恐れがある。したがって、尿尿については、回収型またはコンポスト型のように、尿尿を水系に入れないタイプのトイレによってオンサイトで処理し、雑排水だけを浄化槽等で処理する方法を導入してゆくことが、スラム地区の水環境改善に不可欠であると著者らは考えている。

なお、対象地区がスラム地区であり、また日本から遠隔の土地であることから、計測機会や手段が限られており、今回の計測は必ずしも完全なものとはいえない。今後は、尿尿と雑排水を分離した直接計測なども含めてより精度の高い計測を行ってゆきたいと考えている。

謝辞：本研究は、戦略的創造研究推進事業「持続可能なサニテーションシステムの開発と水循環系への導入に関する研究」(研究代表者：船水尚行)の助成を受けている。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 吉川勝秀：人・川・大地と環境，pp.294-316，技報堂出版，2004．
- 2) Ohmachi, T. and Roman, R. R. 編：Metro Manila In search of a sustainable future, pp.243-251, UP Press, 2002.
- 3) 藤田紘一郎：癒す水・蝕む水，日本放送出版協会，1996．
- 4) UN-HABITAT: Slums of the World: The face of urban poverty in the new millennium?, pp.36-39, UN-HABITAT, 2005.
- 5) SINTAWARDANI, N., IRIE, M., TRIASTUTI, J., ISHIKAWA, T. and AFFENDI, M.: Feasibility of introducing the bio-toilet to decrease the water pollution in an open canal: A case study in Kiaracondong slum area in Bandung City, Future of urban wastewater systems decentralisation and reuse, pp.101-109, 2005.
- 6) 牛島健，石川忠晴，上原英之，中西徹，Corazon, C. D., Sylvano, D. M.：メトロマニラへのコンポスト型トイレによる有機物オンサイト処理の導入の可能性について，環境システム研究論文集，Vol.30, pp.355-362, 2002.
- 7) 例えば，倉沢愛子：ジャカルタ路地裏フィールドノート，pp.107，中央公論新社，2001．
- 8) Almeida, M. C., Butler, D and Friedler, E: At-source domestic wastewater quality. Urban Water 1, pp.49-55, 1999.
- 9) 生活系廃水処理ガイドブック編集委員会編：生活系排水処理ガイドブック，pp.22，環境技術研究会，1981.

(2005.9.30 受付)