

### 3. 人口急増地域の持続的な流域水政策シナリオ -モンスーン・アジア地域等における地球規模水循環変動への対応戦略- ガンジス川流域における水質保全対策の評価

下水処理研究室 室長 南山 瑞彦  
研究官 平出 亮輔  
研究員 桜井 健介

#### 1. はじめに

アジアを中心とした地域では、急激な人口増加や都市化による水問題や、人間活動による水循環の変動などの問題が進行している。このため、アジアの特徴を有する流域を対象として、様々な水問題解決のための政策シナリオを提示し、その成果をツールボックスとしてとりまとめることを目的として、山梨大学砂田教授を研究代表者としたチーム型研究（科学技術振興機構：CREST タイプ）を実施している。その中で当研究室は、ガンジス川流域を対象に、水質問題に重点をおいた水政策シナリオを提示するための調査を行っている。

ガンジス川は、ヒマラヤを最上流として、中国、インド、ネパールを通り、最終的にバングラディッシュで海域に流れ込む、総延長 2,524km、流域面積 1,086 千 km<sup>2</sup> の大国際河川である<sup>1)</sup>（図-1）。その流域面積のうちインドは、861 千 km<sup>2</sup> を占め、全体の約 8 割になる<sup>2)</sup>。インド国民の約 4 割が流域に生活しており、流域人口は約 3 億 6 千万人にもなる<sup>2)</sup>。河川水の利用用途は、上水、農業用水の供給だけでなく、宗教上重要な河川として、人々は聖なる川での沐浴を行っている。しかし、急激な人口増加により、ガンジス川への汚水、廃棄物などが増加し、河川の水質汚濁が問題化してきている。特に、病原微生物などの水系伝染病を引き起こす汚染に関しては、河川との接触が多いインド国民にとって、大きな社会問題となっている<sup>1,2)</sup>。

この問題を解決するには、水質問題に重点をおいた水政策シナリオが必要である。シナリオ作成にあたり、現地住民の生活様式や河川の水質汚濁状況、汚濁源、原単位などの基礎データを十分に把握した上で、今後の経済状況、人口推移等の移行を考慮しつつ、段階的な下水道整備の手法などの政策シナリオを作成することが必要である。しかし、インド政府での聞き取り調査によると、シナリオ作成のための基礎となる汚濁負荷源のデータが整理されていないとのことであった。このため、まず現地における汚濁負荷源の基礎的な調査を行い、その後、調査データ、収集資料を使い政策シナリオの作成を行うこととする。基礎調査の地域としては、広範囲のガンジス川流域の全域を調査することが難しいため、大きな負荷源として代表的なニューデリー（周辺地域含む）を対象として詳細な調査を行い、基本となるデータを整備することとした。



図-1 ガンジス川流域の概略図

#### 2. 問題点の整理

問題点の第 1 は、都市部への人口の集中、増加である。現地の下水道担当者への聞き取り調査によると、電気、水道、道路などの整備を優先し、下水道整備に予算がつかず、人口の増加速度に下水道整備が追いついていない状態にあるとのことであった。このような状態では、処理されていない汚水等の汚濁物が都市部を抜ける河川や周辺の湖などの水辺環境へ流入し、水質汚濁の問題が表面化する。水道水を汚染された水辺に依存している場合は、特に大きな問題と考えられる。ニューデリーにおいても同様の問題が表面化しているとのことであった。

第2の問題点は、自然環境に由来するものである。インドの気候は、ヒマラヤ山脈周辺の亜寒帯、寒帯気候から、西北部の砂漠気候を含む乾燥気候、中部から東部の温帯気候、南部の熱帯気候と地域によって様々である。降雨の特徴は、インド全域で、夏季に南西モンスーンの影響により大陸に湿った暖かい空気が入り降雨が多く、冬季は逆風の北西モンスーンの大陸内部からの空気が入り降雨が少ない傾向にある<sup>3)</sup>。特にガンジス川流域では、7～8月の雨季にのみ降雨が多く、その他の時期はあまり雨が降らない(図-2<sup>4)</sup>)。降雨が偏ると、河川の水量の変動が激しくなり、有効に河川水を利用できなくなる。特に、乾季の終わりに河川水量が極端に少なくなるため、同じ負荷を都市部から排出していても、河川の水質が悪化することになる。

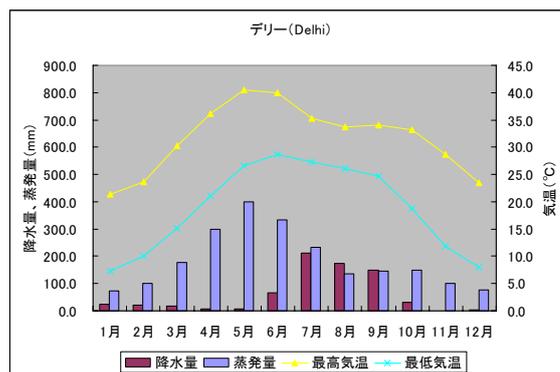


図-2 デリーの気象条件<sup>4)</sup>

第3の問題点は、農業に関するものである。インドの場合、雨が少なく、さらに降っても雨季のみであるため、乾季の水量確保が重要になる。農地を広げるためには、灌漑用水を引くことが多く、ニューデリーの中央を流れるヤムナ川(ガンジス川支流)でも、上流部にダムを建設し、灌漑事業を行っている。灌漑用に多くの水を回すため、ヤムナ川本流の水量が極端に減り、都市部の汚濁物を十分希釈できず、河川周辺の衛生環境が悪化する。

このように、ヤムナ川、特にニューデリー周辺では様々な問題が重なって衛生環境が悪化し、周辺住民に影響を与えている。

### 3. 河川の水質汚濁の現状

河川の現状把握のため、ニューデリー近郊のヤムナ川の河川水質調査を実施した。調査場所は、ニューデリー上流のパラ付近と下流のマジョーリ(下流40km付近)、プリンダヴァン(下流106km付近)である。調査は、雨季9月、乾季2月の2回実施した。

乾季の調査では、パラ付近のヤムナ川は都市の汚濁物が河川に流入する前であるため、水が透きとおりで、良好な状態であった。しかし、都市部通過後は、水が黒くにごり、ゴミが流下しており、都市部汚濁の影響を強く受けていた。特に都市部に近い下流のマジョーリ付近では、河川から硫化水素臭が発生していた。さらに下流のプリンダヴァンにおいては、水は黒いものの、臭気はマジョーリに比べかなり弱く感じられた。

雨季には、パラ付近では水が白濁しているものの、臭気がなく、ゴミもまったくない状態であった。白濁の原因は、雨水による増水等により河川水に土が混ざっているものと考えられる。乾季同様、牛、人間が河川で水浴びを行っていた(写真-1 参照)。下流に関しても臭気がなく、水が白濁していた。乾季に岸に溜まっていたゴミもほぼなくなっており、見た目は良好な状態であった(写真-2, 3)。

図-3に水質分析結果を示す。上流がパラ、下流1がマジョーリ、下流2がプリンダヴァンである。

乾季に関して、すべての水質項目で下流に比べ上流の値の方が低い傾向にあった。マジョーリとプリンダヴァンでは、マジョーリ(下流1)の値の方がすべてにおい



写真-1 パラ付近(雨季)



写真-2 プリンダヴァン(乾季)

て高かった。マジョーリは都市部に近いため、その影響を大きく受けているものと考えられる。さらに下流のプリンダヴァンでは、マジョーリに比べすべての項目で値の低下が見られ、河川における沈殿・自然浄化の効果がうかがえた。

雨季には、若干、BOD、T-N の値が下流で高いものの、上流、下流でほとんど変化がない傾向であった。これは、雨季には降雨による水量の増加および多数の洪水があるため、河川の汚濁が押し流されたものと考えられる。調査を行った河川においては、乾季において汚濁負荷が蓄積され、雨季に押し流される工程を1年周期でくりかえしていることが推定される。



写真-3 プリンダヴァン(雨季)

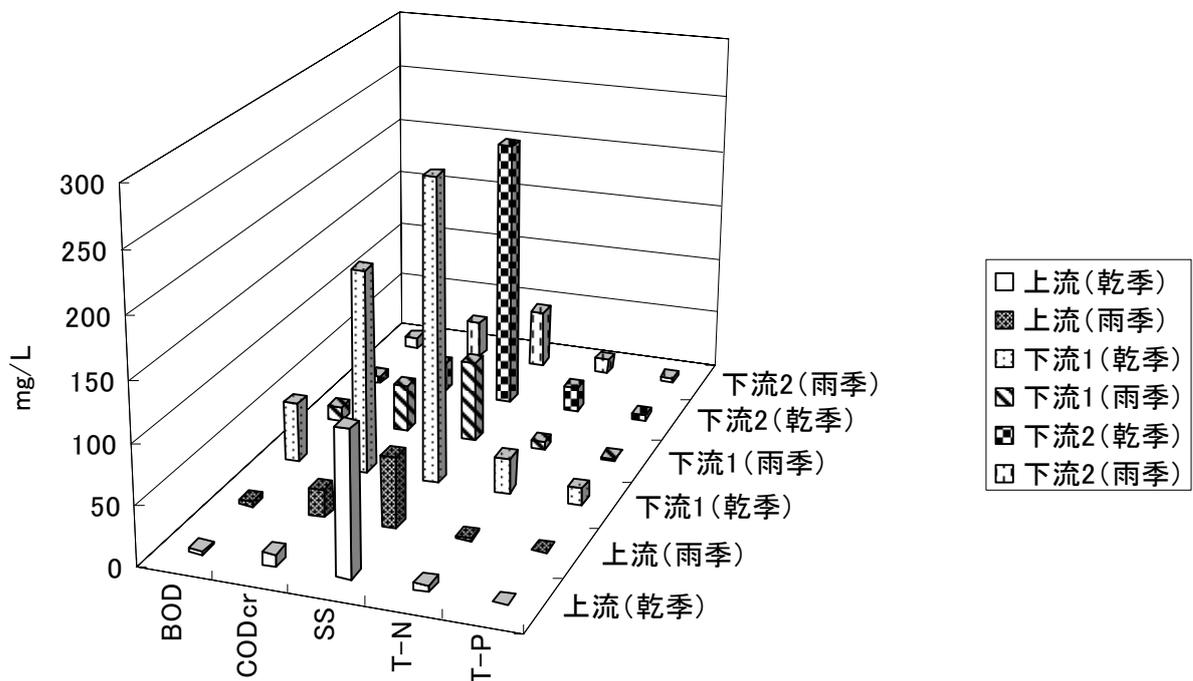


図-3 ヤムナ川の水質分析結果

#### 4. ニューデリーにおける負荷量原単位調査

##### 1) 調査方法

近年、都市部の人口急増に伴う生活排水の増加が問題となっている。このため、都市部での負荷量原単位調査を行った。インドでは貧富の差が大きく、その生活様式が違う可能性があるため、高、中、低所得者層、スラムそれぞれの汚濁負荷源の調査を行った。高、中、低所得者層の区分けに関しては、基本的に収入の違いにより場所を選定した。高所得者層の調査は、ある程度所得がないと購入できない住宅街で、住宅街の入口に警備員が常駐している生活区域があるため、その区画の一部で調査を行った。中所得者層の調査は、公務員の住宅団地の一部で実施した。低所得者層の調査は、比較的賃金が低いとされる業種（小売商人、タクシー、リクシャー等運転手、工場労働者等）で生計を立てている住民の居住区の一部で調査を行った。スラムに関しては、テントや簡易家屋等を空スペースに無断で作成し、生活を行っている区画の一部で調査を行った。また、都市部以外の生活排水として農村部の調査、主要な産業として多数存在し大きな負荷源と考えられる牛舎（搾乳用）の調査を行った。

現地では、サンプリング箇所の決定、現地住民・関係者へのヒヤリングを行い、基礎的な情報を収集した。水

質分析に関して、排水調査は各地点において24時間調査を行った。試料採取は2時間に1回、12時間で1つのコンポジットサンプル（流量比で混合）を作成し、水質分析を行い、水量測定（1回/時間）も行った。牛舎では、朝夕に牛舎内の清掃が行われ、大量の水を使用する時間帯がある。このため、この時間帯の水量測定はポンプ能力と運転時間から求めた値を使用した。

## 2) 汚濁負荷量原単位調査の結果

生活排水系排水の調査結果を表-1に示す。都市部に関しては、スラムの値が全体的に低い傾向にある以外、高、中、低所得者間での傾向の違いが見られなかった。都市部の高、中、低所得者層の調査箇所では、調査時期、日変動、地域差等の理由によりデータがばらついたものと考えられることに加え、低所得者であっても小さな部屋が借りられる程度の収入があるため、食事や生活様式には大きな違いがなかったものと考えられる。一方、スラムは、すべての項目において値が低く、高、中、低所得者の傾向とはまったく違う傾向にあった。家を借りることができない収入であるため、食生活や生活様式が大きく異なったものと考えられる。

農村部に関しては、ほとんどの負荷量原単位が小さく、使用水量も少ない傾向にあった。値としては、都市部のスラムとほぼ同じ値である。農村部の家庭では、腐敗槽が設置されていた。使用水量が少ないことからHRTが長く、処理が十分に進んでいたものと考えられる。家庭での使用水量に関しては、日中、畑で働いているため、屋内で生活していないことが、使用水量が少ない原因であると考えられる。また、場所によっては水道の利用時間が制限されている場合もあるため、これも、使用水量、負荷が少ない原因であると考えられる。

牛舎排水の調査結果を表-2に示す。平成15年のガジプールの値が全体的に低いものの、それぞれ同じような傾

表-1 生活排水系の汚濁負荷量原単位調査の結果

区分	地名	調査年度	排水量 L/人/日	BOD g/人/日	CODcr g/人/日	SS g/人/日	T-N g/人/日	T-P g/人/日	
都市部	高所得者	ゴルフ・リンクス1	H16	500	82.6	219.0	130.3	8.4	17.7
		ゴルフ・リンクス2	H17	436	75.5	302.5	42.5	37.9	4.8
		ジョル・バーグ	H16	140	24.4	50.8	130.6	8.9	2.2
	中所得者	パチクイアン・ロード	H15	216	24.3	41.8	9.6	10.9	1.3
		パハル・ガンジ	H15	73	36.7	46.6	4.4	5.9	1.0
	低所得者	サリマール・バーグ1	H16	154	39.2	102.3	54.7	13.1	5.5
		サリマール・バーグ2	H17	222	197.4	378.8	27.9	22.9	2.8
	スラム	モーラー・バン	H17	14	4.2	10.7	2.9	1.1	0.1
	農村	パラ	H15	47	4.9	8.2	2.6	3.0	0.7
ラトプール・チャテラ		H16	17	3.3	6.0	3.3	2.3	0.9	
ムジェーリ		H16	37	9.6	23.5	8.0	2.8	0.9	

表-2 牛舎の汚濁負荷量原単位調査の結果

地名	調査年度	排水量 L/人/日	BOD g/人/日	CODcr g/人/日	SS g/人/日	T-N g/人/日	T-P g/人/日
ガジプール	H15	123	183.0	878.0	59.0	60.1	5.0
パールサワ1	H16	71	875.0	1849.0	1536.0	83.8	9.1
パールサワ2	H17	59	1062.0	1749.0	585.0	147.0	3.5
マダヌプル1	H16	97	879.0	1529.0	1099.0	118.8	12.5
マダヌプル2	H17	117	742.0	1418.0	1272.0	231.0	2.0
マダヌプル3	H17	142	983.0	1910.0	466.0	263.0	4.0

向にあることがわかる。SSの差に関しては、サンプル中に泥やワラ等の大きな固形物が混入することがあるため、若干の差が生じている。インドは、ミルクティーなどの乳製品を多く使うため、牛乳の生産量が非常に多い<sup>5)</sup>。しかし、冷蔵機器がなく、自転車による運搬（一番費用がかからないため）が主流なため、牛舎が都市部の近辺にあることが多い。今後、都市部の人口増加に伴い、負荷がさらに増加する可能性が高い排水の1つと考える必要がある。

## 5. 農村部の使用水の水質調査

農村部や小さな集落では、整備された排水処理施設がないため、低地に排水を溜めてポンドのようなため池で排水を処理しているところが多い。今回調査を行った地域にも同様なため池があり、ため池の横3mくらいにハンドポンプがあり、住民が沐浴、水浴びに利用しているとのことであった。そのため、衛生状態確認のための水質調査を実施した。調査箇所は、ため池水、ポンプ水、水道水である。すべてスポットサンプルである。なお、ポンプ水採水時には、使用初めはポンプ給水部に溜まっている水がでるため、ある程度水をくみ上げたあとに採水を行った。

水質分析の結果を表-3に示す。ため池とポンプを比較すると、ポンプの値が低いものの、同じような傾向があることがわかる。特に溶解性の項目であるNH<sub>4</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-Nが両方に存在している点から、ため池からハンドポンプに水が移行していることが確認できる。大腸菌群数等の衛生学的安全性の指標に関しては、地層によるろ過のため検出されていない。NH<sub>4</sub>-Nは、人体への強い毒性が無いため特に問題ない<sup>6)</sup>が、糞便汚染の指標の一つであり、今回もため池の影響をポンプが受けている確認ができた。水みち等、何らかの原因で地層によるろ過を受けずにポンプ水として引上げられる可能性もあるため、注意が必要である。比較のために採水した水道水に関しては、窒素濃度がポンプ水よりも高く、形態別ではNO<sub>3</sub>-N濃度が高かった。水道水中の窒素に関しては、世界保健機構（WHO）は、NH<sub>4</sub>-Nの記載が無く、NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 3mg/L以下、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 50mg/L以下（NO<sub>2</sub><sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>とも乳児のミルクビン用の水として与えた場合にメタヘモグロビン症を生じない値）、さらに2つの形態の測定された値を各々の勧告値で割り、加えたものが1を超えてはならないとしており<sup>7)</sup>、日本における水道水の基準（厚生労働省 水道法 水質基準に関する省令）では、NH<sub>4</sub>-Nの記載は無く、NO<sub>2</sub>-N及びNO<sub>3</sub>-Nは10mg/L以下であることとされている。これらとくらべても、水道水から検出されたNO<sub>3</sub>-N濃度は決して低くない値であった。現地の水道供給システムを確認していないため、正確な原因は不明であるが、農地からの肥料の混入、未処理排水の地下浸透が原因で、水道水用の地下水が汚染されている可能性がある。農村部は、都市部とは違う理由で水環境に問題があることを確認することができた。

表-3 農村部の水質分析結果

項目		ため池	ポンプ	水道水
BOD	mg/L	17	6	<1
CODcr	mg/L	69	32	6
T-N	mg/L	55	26	34
NH <sub>4</sub> -N	mg/L	16	10	0
NO <sub>2</sub> -N	mg/L	4.3	3.7	0.03
NO <sub>3</sub> -N	mg/L	23	9	29
大腸菌群数	MPN/100ml	1.4 × 10 <sup>6</sup>	不検出	不検出
サルモネラ菌	25ml中	陰性	陰性	陰性
嫌気性芽胞菌	50ml中	陽性	陰性	陰性

## 6. まとめ

ヤムナ川の水質汚濁の現状は、乾季に汚濁物が溜まり、雨季の降雨、洪水により下流に押し流されるサイクルを1年周期で行っていることを確認した。そのため、乾季に衛生状態がかなり悪く、特に都市部を抜けてすぐの

地域では硫化水素臭があり、河川も黒く、ゴミが岸に溜まっていた。さらに下流に流れると、沈殿、自然浄化の効果により若干状態が良くなるものの、都市部上流に比べればかなり悪い状態であった。

負荷量原単位調査に関しては、都市部の高、中、低所得者の負荷量原単位で大きな差が見られなかった。当初、所得の違いによる排水の違いを考えていたが、低所得者でも部屋を借り生活できる程度の収入があるため、排出負荷としてみた場合に食事や生活習慣に大きな違いがないと考えられる。しかし、スラム、農村部に関しては水量、負荷ともかなり低く、都市部の高、中、低所得者のものとは大きく傾向が違っていた。牛舎の排水は、調査箇所すべてほぼ同じような傾向にあり、都市部の人口増加に伴い、同じように増加していくと考えられるため、重要な指標のひとつと考えられる。

今後の調査に関して、これまで原単位調査や現地の現状把握の調査を中心に行ってきたことで、ある程度の数の現地データを入手してきた。このため、今後はシナリオ作成に向けたインドおよびガンジス河流域国の背景、環境条件、人口分布、土地利用等の文献調査や、実際に処理場を建設するための費用等の費用や処理方法選定のための調査に重点をおいた調査を行う予定である。

なお、本調査研究は（独）科学技術振興機構：JST の戦略的創造研究推進事業委託研究費：CREST の費用を得て実施したものである。

#### 参考文献

- 1) 中島英一郎、他：ガンジス河流域における水質汚濁調査報告、第 41 回下水道研究発表会講演集 平成 16 年度、pp. 582-584
- 2) Ministry of Water Resources, Government of India、<http://wrmin.nic.in/>
- 3) 図解 地図資料 八訂版、帝国書院、p. 82
- 4) THE STUDY ON WATER QUALITY MANAGEMENT PLAN FOR GANGA RIVER IN THE REPUBLIC OF INDIA PROGRESS REPORT (1) APPENDEX, JICA, NRCD, TEC, CTI, 2003. 07、付属資料 p. A2-A3
- 5) 世界の統計 1999 年版、編集 総務庁統計局、発行 大蔵省印刷局、p. 111
- 6) WHO 飲料水水質ガイドライン（第 2 版）第 2 巻、（社）日本水道協会、p. 869
- 7) WHO、Guidelines for Drinking-water Quality, THIRD EDITION, Volume 1, p. 417