

インド国ガンジス河 汚染対策流域管理計画調査

THE STUDY ON WATER QUALITY MANAGEMENT PLAN FOR GANGA RIVER IN THE REPUBLIC OF INDIA

佐藤 弘孝¹・吉川 勝秀²

Hiroataka SATO and Katsuhide YOSHIKAWA

¹ 非会員 工修・水資源修 株式会社東京設計事務所 海外事業部 (〒100-0013 東京都千代田区霞ヶ関 3-4-7)

² 正会員 工博 日本大学教授 理工学部社会交通工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1)

Ganga Basin, the largest river basin in India, is supporting nearly 40 percent of the country's population. The Ganga and its tributaries, besides being the source of water supply and irrigation, are regarded as sacred rivers and are intensively used for bathing by the people. In recent years these rivers have been significantly polluted by the increased human activities, adversely affecting human health and river ecosystem. In response to a request from the Government of India, Japan International Cooperation Agency (JICA) implemented a development study in order to understand pollution mechanism in the basin and formulate a water quality management plan consisting of sewerage and non-sewerage schemes to improve the water quality of the Ganga.

Key Words: Bathing, Ghat, Ganga Action Plan, Interceptors, Point and non-point pollution sources, Exceeding probability

1. はじめに

ガンジス (印名: ガンガ) 河は、上水道、工業及び灌漑用水源としてインド北部の生活・経済活動に重要な役割を果たしている。更に、聖なる河として、河岸では多様な宗教儀式が執り行われ、インドの人々の心の拠り所となっている。これは、ガンジス河固有の特質である。

一方で、流域における近年の急激な人口増加や工業の発展は、ガンジス河の水質を悪化させ、流域の自然、生活、沐浴環境に負の影響を与えている。この状況を改善するため、インド国政府は、80 年代中葉以降、下水道及び河岸施設の整備を含む水質汚濁対策「ガンジス河アクションプラン (GAP)」を実施してきた。その結果、ガンジス河の水質はある程度改善したものの、未だ、多くの河川区間で沐浴水質基準を満たすに至っていない。

本調査の目的は、2030 年を目標とするガンジス河の水質改善計画を立案することであり、調査は、インド国政府の要請に基づき、独立行政法人国際協力機構 (JICA)

により 2003 年から 2005 年にかけて実施された。

調査では、ガンジス河流域全域を対象に水質汚濁解析を実施し将来水質を予測した。次いで、主要な汚染源であり、政治経済・文化的に重要な中流域に位置する 4 大都市 (ラクノウ、カンパール、アラハバッド、バラナシ市) を対象に汚濁削減計画を策定した。

2. 調査対象地域

(1) ガンジス河流域の概要

ガンジス河本流 (図-1) は、ヒマラヤのガンガトリを源流とし、ベンガル湾までの約 2,500km を流下する。その間、26 の主要河川が本流に合流し、総面積約 84 万 km² (インド国土の 25%、日本国土の約 2.2 倍) のガンジス河流域を形成している。主要な支川は、首都デリーを貫流するヤムナ河、ウッタル・プラデッシュ (UP) 州の州都ラクノウを貫流するゴムチ河等である。流域内の人口はおよそ 4 億人、9,100 万人が都市に、3 億 1,000 万人

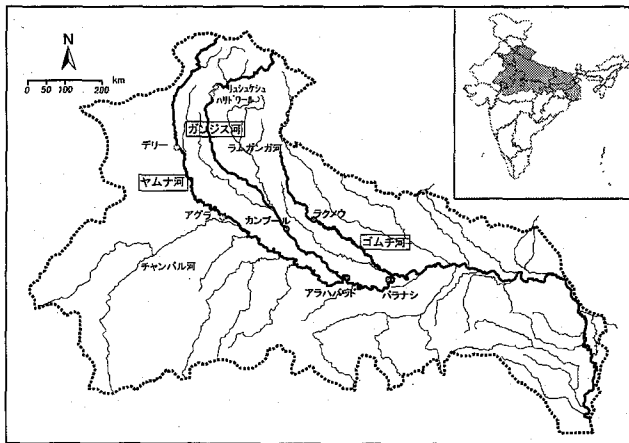


図-1 ガンジス河流域と主要都市

が農村に居住している。人口密度は474 人/km² (日本:330 人/km²) であり、年間 2.6%の高い率で人口が増加している。ガンジス河本支流から出た灌漑運河網は、流域の約70%を占める広大な農地に灌漑用水を供給している。

(2) 対象都市の特色

ラクノウ市は、ガンジス河支流のゴムチ河岸に位置し、人口 240 万人を有する UP 州の州都である。

ガンジス河岸に位置するカンプール市は、UP 州最大の人口 (290 万人) を有し、商工業活動の中心地である。

アラハバッド市は、人口 120 万人を有し、二つの聖なる河ヤムナ河とガンジス河の合流点に位置する。この合流点 (サンガム) はヒンズー教の聖地であり、多様な宗教行事及び儀式が執り行われ、毎年数十万人の巡礼者の目的地となっている。特に、6 年ごとに行われるクンブメーラ大祭の期間には、巡礼者は数百万人に膨れ上がる。

バラナシ (英名: ベナレス) 市は、ガンジス河岸に位置し人口 130 万人を有する。現存する世界最古の都市、ヒンズー教最高の巡礼地の一つとされている。市の 7 km にわたる沐浴ガート (河岸沐浴場) は、毎日数千人の巡礼者の沐浴に供している。ヒンズー教では墓をつくらず、遺灰は、天国に通じる聖なる川に流すが、バラナシは天国に最も近い聖地とされている。ヒンズー神話によると、ここの河岸火葬ガートで荼毘に付され、遺灰が川に流されると、瞬時に輪廻 (再生) のサイクルから解放され、魂は永遠の平安に眠ることができるとされている。

3. 水質汚濁解析

(1) 河川システム

ガンジス河流域を38の河川流域に分割し汚濁解析モデルを作成した。ガンジス河、ヤムナ河及びゴムチ河を本川とし、残りの河川を支流として扱った。模式図を図-2に示す。

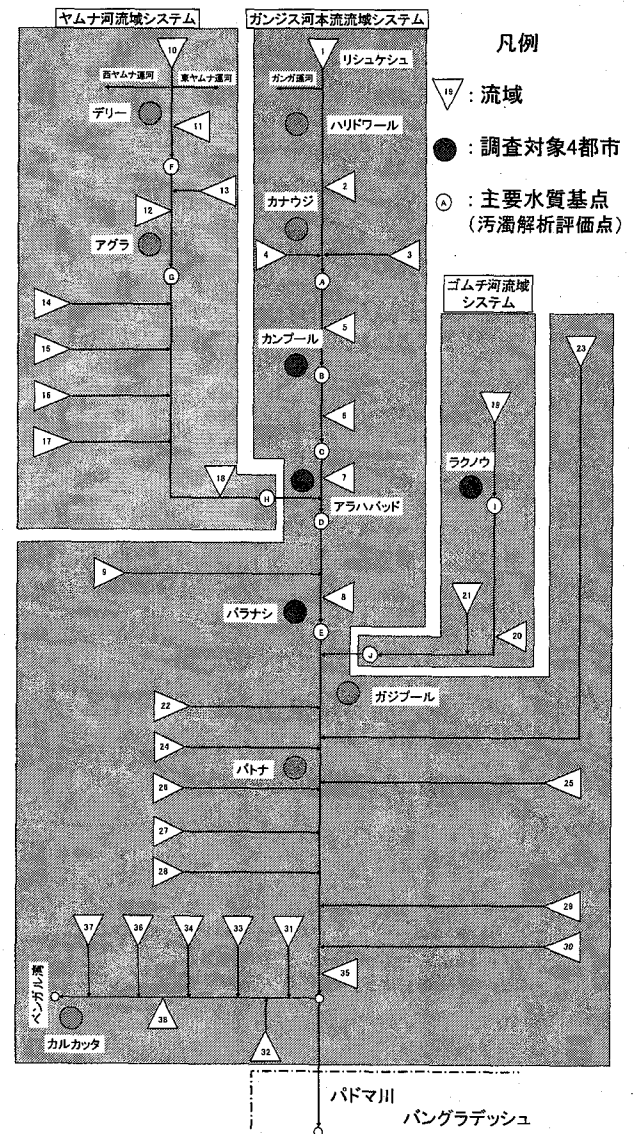


図-2 汚濁解析用ガンジス河流域模式図

(2) 汚濁負荷量の推定方法

ガンジス河流域全域のデータを収集し、GIS データベースに格納した。地図データは、都市位置、行政区域界、土地利用、標高、河川、流域、水質及び流量観測点等からなり、数値データは人口、家畜数、観測点での水質・流量値、工業汚濁負荷、既存の下水処理場のデータ等からなる。河川流量及び水質データは、1997 年 - 2001 年の5年間の月平均データを解析に使用した。

汚濁解析モデルは、水質が特に悪化する乾期の水質を再現できるよう構築した。このため、流量及び水質データを統計処理し、乾期に相当する流量として超過確率 90% 値 (ある流量が 90% の確率でこの流量を超える値) を採用し、一方、水質は非超過確率 90% 値 (ある水質が 90% の確率でこの水質を超えない値) を採用した。水質指標は BOD₅、DO 及び大腸菌群とした。本報告では、主に BOD₅ について詳述する。

発生汚濁負荷量を点源と非点源に分類し、下水道が整

備された地域から発生する都市生活及び工業起源を点源とし、農村生活、家畜、土地利用起源を非点源とし集計した。本川へ流達する汚濁負荷量は、式(1a)により発生汚濁負荷量に係数をかけて算定した。汚濁負荷の発生流出モデルを図-3に示す。

$$L_R = L_G \times R1 \times R2 \quad (1a)$$

L_R : 本川への流達汚濁負荷量

L_G : 発生汚濁負荷量

$R1$: 流出係数(点源:P-R1、非点源:N-R1)

$R2$: 支流での自浄率

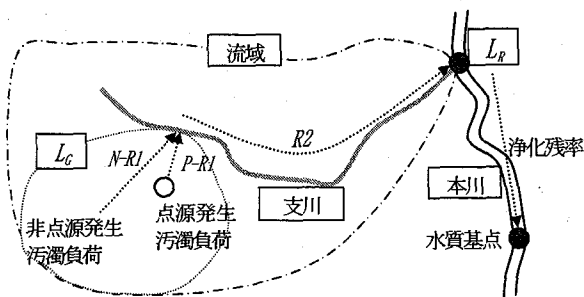


図-3 汚濁負荷量発生流出モデル

一方、本川に流達した汚濁負荷量は、水質基点に到達するまでに、本川内の自浄作用により低減するとして、低減率はStreeter-Phelps式(2a)を用いて算定し、水質基点での水質は、その地点での汚濁負荷量と河川流量から算定した(2b)。

$$\text{BOD 低減率: } dC/dt = -K \times C \quad (2a)$$

$$\text{本川 } i \text{ 地点での BOD 濃度: } C_i = L_i/Q_i \quad (2b)$$

C : 水質(BOD)

C_i : i 地点での水質

L_i : i 地点での汚濁負荷量(BOD)

Q_i : i 地点での河川流量

K : 浄化係数

モデル流域における汚濁負荷量収支、河川流量及び水質の実測値を基に、各係数を表-1のとおり推定した。

表-1 推定された汚濁負荷流出係数及び支流の自浄率

項目	数値
P-R1 (点源汚濁負荷量流出係数)	0.8
N-R1 (非点源汚濁負荷量流出係数)	0.01
R2 (支流での自浄率)	0.4%減少/流下km
K (浄化係数)	0.123 1/日

点源汚濁負荷は、主に管路や水路を通じて直接支流に放流される。その流出係数(P-R1)は、インドで一般的に使

用されている0.8を採用した。一方、非点源汚濁負荷は、主に降雨時に河川に流出するため、雨期に流出係数が大きく乾期には極端に小さくなる。降雨量と河川流量が相関関係にあることを利用し、非点源の流出係数(N-P1)を、河川流量との関係(図-4)で推定した。これを基に、乾期の非点源の流出係数を河川流量の超過確率90%値に相当する流出係数(0.01)として算出した。支流に到達した点源・非点源汚濁負荷は、距離に比例して低減するとして、その自浄率(R2)を推定した。

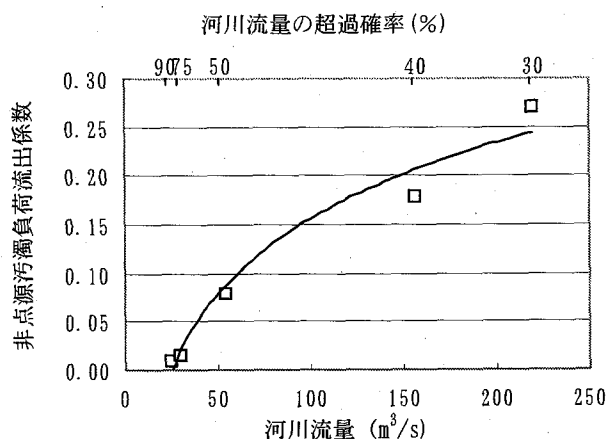


図-4 モデル流域における非点源汚濁負荷量の流出率と河川流量の関係

構築した汚濁解析モデルは、図-5のとおり、既存河川水質をほぼ忠実に再現できた。

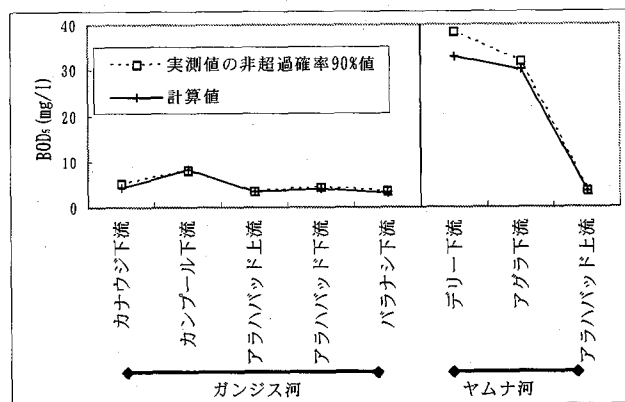


図-5 水質の実測値と計算値

(3) 汚濁負荷量の推定結果(図6及び図-7)

ガンジス河流域におけるBOD発生汚濁負荷量(2001年)は、11.6百万kg/日と推定された。その内訳は、土地利用に起因する負荷量が41%と最大であり、点源負荷は16%を占めるのみである。一方、超過確率90%流量時における本川へのBOD流出負荷量は0.5百万kg/日であり、発生負荷量の約4.3%が本川に流入する。そのうち、点源汚濁負荷量が94%を占める。

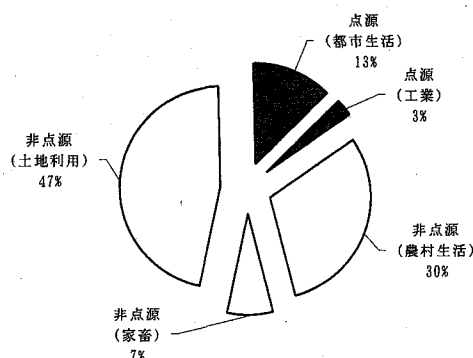


図-6 BOD 発生汚濁負荷量の比率

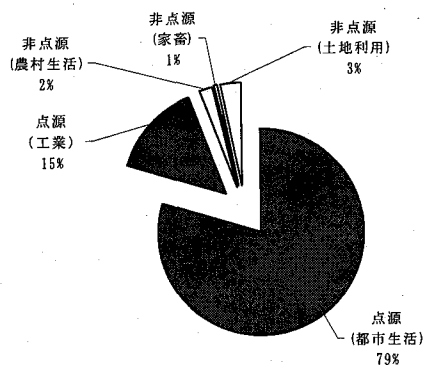


図-7 BOD 流出汚濁負荷量（超過確率 90%流量時）の比率

(4) 河川水質予測

(a) 水質基準

河川の水質基準は、表-2 のとおり 5 類型に分類されており、ガンジス河本流では、源流から 0-250km 区間で A 類型、250-2450km 区間で B 類型、2450km 下流で C 類型に指定されている。本計画では、沐浴用基準である B 類型を目標として汚濁対策を計画した。

表-2 インド国の河川水質基準

類型	用途	pH	BOD (mg/l)	全細菌 (最確数/100 ml)
A	無処理で飲料用	6.5 - 8.5	2 以下	50 以下
B	屋外沐浴用		3 以下	500 以下
C	通常処理にて飲料用			5000 以下
D	野生生物及び魚類用	6.0 - 8.5	-	-
E	灌漑、工業冷却水、排水処理用		-	-

補足：類型 B に、糞便性大腸菌 500 最確数/100 ml 以下（推奨）、2,500 MPN/100 ml 以下（最大許容量）が追加された。

(b) 河川水質の状況

ガンジス河の流下方向の水質（BOD）を超過確率値により図-8 に示す。最上流部では、沐浴基準を満たすが、以降、河川水質は悪化する。これは、乾期には、ガンジス

河のほぼ全流量がハリドワールのガンガ運河から取水され、本流の基底流量が極度に減少することが主因である。更に、カンパール市下流では、市から大量の無処理污水が流入することにより、水質は極度に悪化する。その後、アラハバッド市では、ヤムナ河沿岸に位置する大都市デリー及びアグラ等の污水を受入れたヤムナ河が流入するものの、ガンジス河流入前に流量が豊富で水質の良いチャンバル川がヤムナ河に流入するため、希釈効果により、アラハバッドでの水質の悪化度は小さい。

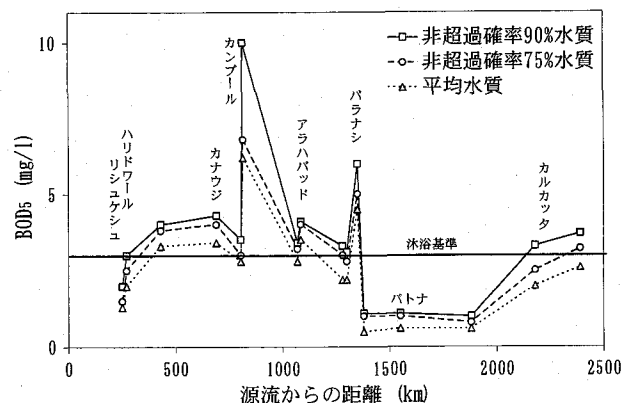


図-8 ガンジス河本流の既存水質（BOD）

バラナシ市の沐浴場区間の水質測定結果（表-3）によると、バラナシ市の沐浴場の河川水質は、バラナシ市下流の水質観測点の水質より遥かに悪い。これは、バラナシ市の未処理污水が沐浴場区間のガンジス河に直接流入していることによる。

表-3 バラナシ市におけるガンジス河の BOD 濃度 (mg/l)

ガンジス河流下方向	左岸（沐浴場）からの距離			
	2 m	20 m	1/4 川幅	1/2 川幅
バラナシ市上流 2 km 地点	6	5	7	9
バラナシ市中心部	22	20	18	7
バルナ川合流点上流 200 m	14	10	13	11
バルナ川合流点下流	50	4	2	18
バルナ川合流点 1.5 km 下流	15	5	5	5

(c) 水質予測結果

構築した水質汚濁解析モデルを基に、将来人口や家畜数の増加、工業排水の増加等を予測し、シナリオ別に将来水質を予測した。なお、非点源汚濁量の水質影響は僅少であり、その制御は通常困難であるため、削減の対象としなかった。

2030 年における水質予測結果を図-9 に示す。現在の下水処理能力のみの場合、河川水質は現在の約 2 倍に悪化する。ガンジス河の対象区間の水質を沐浴水準以下にするためには、都市生活汚濁負荷の削減率を対象 4 都市で

90%前後、ガンジス河全域で一様に80%とする必要がある。加えて、カンプールでは、工業汚濁負荷を含めた削減が必要である。ガンジス河流域には、約220の主要都市が点在しているが、ケーススタディにより、4都市に到達する汚濁負荷量の大きい都市から上位35都市の汚濁負荷を80%程度低減することにより、対象地域の水質を沐浴基準以下に低減できることが予測された。

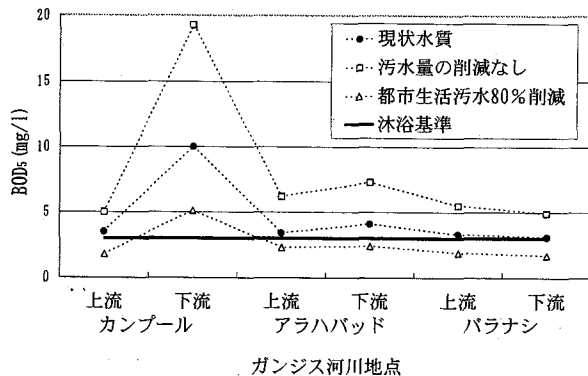


図-9 シナリオ別将来水質 (BOD) 予測 (2030)

本調査では、糞便性大腸菌の水質シミュレーションを試行した。その結果、水質基準を満たすためには、下水処理場での殺菌、点源に加え非点源汚濁負量を削減する必要があることが判明した。ただし、既存水質データの質の問題等によりモデルの精度が今後の課題となった。

4. 河川水質改善対策

水質基準を遵守するためには、点源、特に都市生活污水対策が急務である。従って、汚濁削減策として、下水道施設の整備を計画した。また、下水道以外では、都市内の沐浴環境を改善するための対策を計画した。更に、計画した事業の持続性を確保するため、組織制度計画の立案、環境影響評価及び経済財務評価を実施した。

(1) 下水道対策

(a) 対策計画の方針

最終的には面整備を含めた都市下水道を整備することを目的として計画を立案しが、整備費用が膨大となることから、2段階による整備を提案した。

短中期計画 (遮集型下水道の整備) : 主に河川水質の改善を目的とする。雨水排水路及び污水放流管の末端に遮集設備を設け污水を遮集幹線で収集し、下水処理場にて処理し放流する。

長期計画 (下水道の面整備) : 都市内の衛生環境を併せて改善する。下水道の面整備を行い、下水道の戸別接続の増加を図る。

(b) 下水処理区の配置計画

分散型下水道システムは、污水輸送費の低減及び下水

道施設の容量を低減でき、また、各下水処理場の規模も小さくなり、用地選定が容易になる他、維持管理も比較的容易となる。一方で、規模の経済 (小規模なほど単位汚水量あたりの単価が高くなる) を考慮し、処理区の分割には、ある程度の規模を確保するよう留意し、数地区の処理区に分割した。

(c) 下水処理方法

検討した処理法を以下に記す。

- 安定化池 (WSP)
- 活性汚泥法+塩素消毒 (ASP)
- エアレイト・ラ・ン+熟成池 (AL+MP)
- エアレイト・ラ・ン+塩素消毒 (AL+CL)
- 上向流式嫌気性ろ床法+エアレイト・ラ・ン+塩素消毒 (UASB+AL)

- 流動式好気性生物反応法+塩素消毒 (FAB)

処理方式は下記要素を比較・評価し選定した。

- ライフサイクル (土地・建設・維持管理費用)
- 所要電力・所要用地
- 処理水質
- 汚泥処理・処分・再利用

ライフサイクル (LCC) の算定例を表-4に示す。このケースでは、UASB+AL法のLCCが最小となった。

表-4 必要用地面積と費用比較 (百万ルピー)
(アラハバッドのヌマヤダヤ処理区の例)

項目	WSP	AL+CL	AL+MP	AS	FAB	UASB+AL
土地費用	250	70	150	40	12	70
建設費	80	125	160	135	230	150
年維持管理費	3.0	15.0	16.0	18.0	29.5	6.5
ライフサイクル	379	449	583	491	784	350

ライフサイクル計算条件：年5%割引率、30年ライフサイクル等

更に、4市における以下の制約条件を考慮した。

- 電力供給の制限：計画停電が多いことから、使用電力量の大きな方式は可能な限り回避する。
- 施設用地の制限：市街化が著しく、一部処理区を除き下水処理場用地の制約がある。

この制約条件を基に、以下のとおり、処理方式の選定ガイドラインを作成した。

- 十分な用地取得が可能な場合は、電力消費量が最小で、維持管理が容易であり、安定した処理水質を得ることのできる「安定化池」を採用する。
- 「安定化池」に必要な用地が得られない場合は、「UASB法+エアレイト・ラ・ン+塩素消毒」を採用する。
- 用地が狭小で代替地がない場合は、「流動式好気性生物反応法+塩素消毒」を採用する。

なお、可能な限り汚濁負荷の流入を低減するため、処理水はガンジス河に放流せずに灌漑用水に再利用する。

(2) 下水道以外の対策

下水道以外の対策として以下の対策を計画した。

- ・ 沐浴場での伝統的商業洗濯場の内陸部への移設
- ・ 屋外排泄防止対策として沐浴場及びスラムへの共同便所の設置
- ・ 河岸沐浴場の衛生改善

下水道対策に比較し、河川の汚濁負荷量の削減効果は少ないものの、沐浴場の美化や衛生状況の直接的な改善に効果的な対策である。特に、対象各都市のスラム人口の内、数十万人が野外排泄をしており、この汚濁負荷量の削減対策は重要である。

更に、住民への衛生教育・啓蒙活動を支援活動として計画した。住民の啓蒙レベルを個人の問題から河川環境配慮まで段階的に改善するため、表-5 に示す 4 段階の活動を計画した。

表-5 衛生教育・啓蒙活動の概念

期	主要な活動	中心テーマ
短期	健康と衛生の意識を高める	個人（健康と衛生）
中期	関係機関と住民の相互理解を高める	地域問題と住民参加
中長期	施設の維持管理を共有する意識を高める	費用負担と支払意思の向上
長期	都市環境改善に関する啓蒙活動	都市河川への環境配慮

(3) 環境影響評価

本調査で計画された事業は、生活環境及び河川水質を改善する正の影響をもたらす事業であるが、一方で、事業実施は特定領域に負の影響をもたらす。環境影響評価を実施し、主要な負の影響を同定し緩和策を提言した。

(4) 組織制度計画

下水道及び河川水質改善施設の建設及びその後の持続的な維持管理を確保するため、建設・維持管理組織の一元化、組織・財務強化策を計画した。

(5) 経済・財務評価

2030 年までの総事業費は、約 730 億ルピーであり、河川水質を改善するための第 1 期事業費は約 160 億ルピーと算定された。

経済評価では、①ガンジス河水質改善に対する支払い意思額、②改善された下水道サービスに対する支払い意思額、③衛生状況改善による医療費の節減等を便益として算定した。算定された経済的内部収益率は、各市で全て 5%以上となり、国民経済上、事業が実現可能であることを示した。

一方、財務評価の結果、想定しうる下水道料金収入では、建設費の回収は困難であることが示された。更に、

維持管理費のみを料金収入で賄うケースでは、現在の各都市の安価な料金を 70%~950%値上げする必要があることが示された。河川水質を改善するためには、維持管理費の一部にも補助金の投入が必要となる。

(6) 河川環境改善パイロットプロジェクト

沿岸最大の聖地バラナシ市で最も重要な火葬ガート、最古にして最も神聖な沐浴ガートの一つであるマニカルニカガートの衛生改善事業をパイロットプロジェクトとして実施した。その重要性を考慮し以下の方針で施設の改善を行なった。

- ・ ステークホルダー協議（10 回）による合意形成
- ・ ガートの美観及び神聖な雰囲気損なわずにガートの美化を促進
- ・ 建築材料は、全てバラナシ固有の材料を使用
- ・ 既存の色彩及び材料と融合するよう施設を改造
- ・ ガートの考古学的、建築学的な価値を向上
- ・ ガンジス河の水位変動（10 m 以上）を考慮
- ・ 持続的な維持管理のためステークホルダーを組織化

5. おわりに

河川は、都市・工業・灌漑用水としての使用に加え、近年、娯楽空間としての使用が増加している。インドでは、世界的にも珍しく、河川を宗教・文化的なものとしている。ヒンズー教では、ガンジス（河）は神であり母である。現世では、罪や穢れを清め、来世では、輪廻を転生させ、輪廻から解放する。

近年の活発な人間活動により、河川水質は極度に劣化している。人々が汚染した河川で、人々は神聖な沐浴をし、転生を遂げる。総合的な手法で立案された本調査の水質改善対策は、ガンジス河の水質問題の解決に寄与するものであり、その特有の価値である神聖さを向上することが期待される。

6. 謝辞

広大なガンジス河流域を対象に、2 年半にわたり、日本側調査団、インド政府関係者、インド人技術者により調査が実施され、今般、その成果を、本調査の関係者を代表して報告させて頂きました。調査期間中、JICA、外務省、国土交通省、環境省、在インド日本大使館の各位には多大なご協力とご支援を賜り、ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) インド国ガンジス河汚染対策流域管理計画調査報告書、JICA、平成 17 年 7 月

(2007.4.5 受付)