

開発途上国の都市部におけるし尿・生活排水処理の段階的改善計画手法の開発に関する研究(2) - ケーススタディーによる検討 -

RESEARCH ON THE DEVELOPMENT OF PLANNING METHODOLOGY FOR STEPWISE IMPROVEMENT OF
HUMAN EXCRETA/WASTEWATER MANAGEMENT SYSTEMS IN URBAN AREAS OF DEVELOPING COUNTRIES (2)
- A CASE STUDY -

小嶋公史* 北脇秀敏** 桜井国俊** 大森信慈*** 南部敏博****
Satoshi KOJIMA Hidetoshi KITAWAKI Kunitoshi SAKURAI Shinji OHMORI Toshihiro NAMBU

ABSTRACT: The problems of inadequate treatment of human excreta and wastewater in the urban area of developing countries are becoming more and more serious. Funds for the environmental improvement are, however, strictly limited at the present condition. Considering this situation, this study aims at the development of a simulation model to identify the best plan for sanitation system improvement with which adverse effects by domestic wastewater could be minimized. In this model, BOD loading is used as the indicator of environmental aspect while fecal coliform is used as that of health aspect. Actual data used in model were collected in Cirebon city located in the western part of Jawa Island, Indonesia.

KEYWORDS: Indonesia, human excreta, wastewater, sanitation system, planning methodology

1. 研究の背景と目的

近年開発途上国における急速な工業化、都市部への人口集中、さらに上水道の整備にともなう水使用量の急増などが要因となって、都市部におけるし尿、生活排水の不適切処理の問題が極めて深刻化している。しかし開発途上国においては、環境衛生セクターへ投入できる資金は極めて限られているのが現状である。

このような背景をふまえ、本研究は、途上国で現在使用されているか、あるいは積極的に導入しようとしている各種のし尿・生活排水処理システムを、時間軸に沿ってどのように選択し組み合わせていけば家庭排水による衛生・環境影響を効果的に削減できるかを検討し、厳しい資金制約の下で段階的に改善を進めていく手法を開発することを目的として実施されている。前報では、インドネシアの現地調査を通じて収集した資料から同国のし尿・生活排水処理の現状について報告した¹⁾。本報では、その後し尿・生活排水処理システムの整備効果を分析するためのシミュレーションモデルの開発に着手したので、その概要を報告する。

2. シミュレーションモデルの概要

2.1 基本設定

本研究は、インドネシア西部ジャワのチレボン市を対象都市としているが、本報では、シミュレーションモデルの開発を目的としているため、対象都市を単純化したモデル地域を仮定して計画を行った。すなわち、計画区域面積1000ha、計画初年度人口20万人、人口増加率年率2%というチレボン市と同規模のモデル地域を仮定してシミュレーションに使用した。

途上国における環境衛生設備の計画においては、環境保全だけでなく、保健衛生も重要である。本研究ではこの2つの観点から整備計画の効果を評価するために、汚濁負荷の解析には環境面の指標としてBOD負

* (株) パシフィックコンサルタンツインターナショナル Pacific Consultants International

** 東京大学工学部都市工学科 Department of Urban Engineering, The University of Tokyo

*** 国際協力事業団派遣専門家 (在インドネシア) JICA Expert in Indonesia

**** 岐阜県保健環境研究所 Gifu Prefecture Health and Environment Research Center

荷を、衛生面の指標として糞便性大腸菌群を使用した。モデルで使用する係数については現地で収集したデータを極力取り込んだが不明なものについては仮定値をおいた。なお計画評価期間は20年間とした。

2. 2 検討に用いた処理システム

本研究において検討に用いた処理システムは、現地調査により実際に用いられていることが明らかとなった(1)～(3)および今後導入が予想される(4)と(5)の5つである。

- (1) 下水道：終末処理場として安定化池を伴う。し尿と雑排水の合併処理である。
- (2) 個別処理システム：腐敗槽およびリーチングピット。インドネシアで最も普及している処理システムで、し尿単独処理である。
- (3) 公共トイレ：低所得層の人々が居住するカンポン地域の衛生対策に建設されている。トイレの他に洗濯場、水浴場を伴うタイプ(MCKと呼ばれる)が普及している。公共トイレは腐敗槽もしくはリーチングピットを伴い、し尿のみ処理する。
- (4) インターセプター下水道：現在道路側溝から河川に直接排水されている雑排水を河川に沿った遮集管で受けて処理場に送るか、もしくは下流域に放流するものである。雑排水のみを対象とする。
- (5) 公共腐敗槽：コミュニティからの排水を合併処理方式で小規模に集合処理するシステムである。現在インドネシア政府が下水道の整備が遅れそうな地域の処理システムとして導入を図っている。

2. 3 モデル開発上の主な前提条件

今回のモデル開発は、以下の前提条件に基づいて進めた。

- (1) 建設費、維持管理費の費用比較には行政側の支出のみを考え、個人負担分は考慮しない。
- (2) 便益を定量的に表示する指標としては、標準整備方針と対比した場合の削減汚濁負荷量を使用する。
- (3) 汚濁負荷量としては、河口などの観測基点に到達した負荷量を使用する。
- (4) 効果の現れ方が早いものをより高く評価するために、早く生じた便益をより高く評価するように割引率を設定する。
- (5) 計画区域の区域割りは考えず、1ブロックのみを設定する。
- (6) 下水道への各戸接続の負担が下水道の効果発現の障害となっていることに鑑み、整備方針の一つとして、下水道整備済み地域において接続補助金を支出する整備方針についても検討する。また個別処理システムの汚泥引き抜きについても、同様に公共側が料金を一部負担する整備方針も検討する。
- (7) 係数の設定については、インドネシアで用いられている数値を優先的に使用し、それが無い場合には日本の数値を参考にし、それも更に無い場合には仮定値を用いる。

2. 4 シミュレーションの手順

シミュレーションの手順を図1に示す。

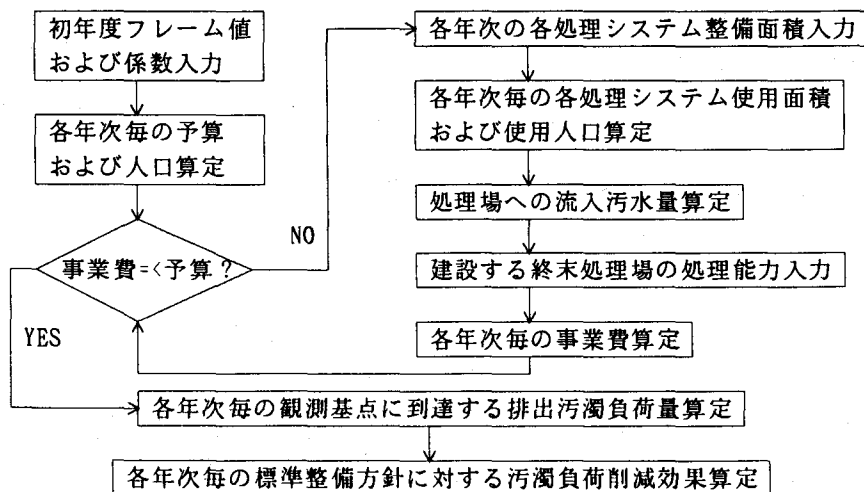


図1 シミュレーションモデルのフローチャート

3. モデル式

3. 1 事業費算定モデル

事業費の算定に使用した式を表1にまとめる。建設費は基本的には1人当たり単価をもとに計算する²⁾。ただし下水道管渠の建設費は枝線と幹線の両方を建設する場合は人口密度の影響を受けると考え、面積当たりの整備単価で考える⁹⁾。公共腐敗槽使用地域に下水道を整備する場合は幹線のみ建設すれば良いので1人当たりの単価で考える。処理場建設費は処理能力の関数であると考え⁹⁾、建設期間を通じて均等に割り振る。維持管理費は下水道管渠、公共腐敗槽、公共トイレおよびインターセプター下水道については使用人口に維持管理単価を乗じたものとする²⁾。また終末処理場維持管理費は処理能力の関数とする⁹⁾。

表1 事業費算定式

下水道管渠	建設費 (万Rp.)		維持管理費 (万Rp.)
	新規	$(a D_n^{1/2} + b) \cdot N_{GSn}$	$O_G \cdot P_{Gn}$
	公共腐敗槽地域	$Y_T \cdot N_{GKn} \cdot D_n$	
終末処理場		$k_1 Q_{max}^{k_2} / T_c$	$O_T \cdot Q_{max}$
公共腐敗槽		$Y_S \cdot P_{Sn}$	$O_S \cdot P_{Sn}$
公共トイレ		$Y_C \cdot P_{Cn}$	$O_C \cdot P_{Cn}$
インターセプター下水道		$Y_I \cdot P_{In}$	$O_I \cdot P_{In}$

下水道各戸接続に対する補助金については次のように考える。接続率 p_1 が $p_1 = \sigma_1 \cdot S_1 + \tau_1$ で定まると仮定する。 n 年次の下水道各戸接続補助金総額は

$$H_{Gn} = S_1 \cdot U_{Gn} = S_1 \cdot \{ U_{Gn-1} + (\sigma_1 \cdot S_1 + \tau_1) \{ 1 - (\sigma_1 \cdot S_1 + \tau_1) \}^{n-1} N_G^1 + (\sigma_1 \cdot S_1 + \tau_1) \cdot \{ 1 - (\sigma_1 \cdot S_1 + \tau_1) \}^{n-2} N_G^2 + \dots + (\sigma_1 \cdot S_1 + \tau_1) N_{Gn} \}$$

個別処理システムについては公共セクターが負担する維持管理費は汚泥引き抜き補助金である。汚泥引き抜き率と補助金の関係を $p_2 = \sigma_2 \cdot S_2 + \tau_2$ とする。これより汚泥引き抜き補助金総額は

$$H_{Kn} = S_2 \cdot (\sigma_2 \cdot S_2 + \tau_2) (U_{Kn} + U_{Bn}) \cdot D_n / m \text{ となる。}$$

S_x : 補助金単価 ($x = 1$: 下水道各戸接続、 2 : 汚泥引き抜き) [万ルピア/戸]
 σ_x, τ_x : 補助金効果係数
 a, b : 係数
 D_n : n 年次の人口密度 [人/ha]
 Y_x : 建設単価 ($X = T$: 公共腐敗槽地域での下水道建設、 S : 公共腐敗槽、 C : 公共トイレ、 I : インターセプター下水道) [万ルピア/人]
 O_x : 維持管理単価 ($X = G$: 下水道管渠、 T : 終末処理場、 S : 公共腐敗槽、 C : 公共トイレ、 I : インターセプター下水道) [万ルピア/人]
 Q_{max} : 終末処理場処理能力 [m^3/d]

T_c : 終末処理場建設年数 [年]
 N_{xn} : 各処理システム新規整備面積 ($X = GS$: 下水道、 GK : 公共腐敗槽地域での下水道建設、 S : 公共腐敗槽、 C : 公共トイレ、 I : インターセプター下水道) [ha/年]
 P_{xn} : 各処理システム使用人口 ($X = G$: 下水、 S : 公共腐敗槽、 K : 個別処理維持管理良好、 B : 個別処理維持管理不良、 C : 公共トイレ、 I : インターセプター下水道、 N : 処理システムなし) [人]
 U_{xn} : 各処理システム毎使用面積 [ha]
 m : 家族構成人数 [人/戸]

3. 2 汚濁解析モデル

汚濁解析は日本の流総における負荷量算出の考え方⁸⁾を用いモデル式を作成した(図2)。計算に用いた項目は、BOD負荷量に関しては衛生処理システムの処理効率と、側溝や小川等での沈殿、分解に起因する流達率、さらに河川流下に伴う自浄作用であり⁸⁾、糞便性大腸菌群に関しては処理効率、流達率および死滅係数である¹⁰⁾。雑排水起因の糞便性大腸菌群はし尿起因のものに比べ無視できると仮定した。使用したモデル式を表2から表4に示す。

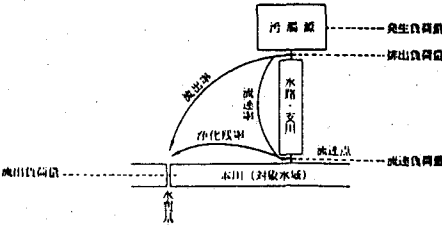


図2 負荷流出の概念図

表2 観測基点における雑排水起因BOD負荷量(g/d)

下水道	$(1 - \alpha_1) \exp(-K t_2) L_1 \cdot P_{Gn}$
公共腐敗槽	$(1 - \beta_1) \exp(-K t_2) L_1 \cdot P_{Sn}$
インターセプター下水道	$\theta (1 - \alpha_1) \exp(-K t_2) L_1 \cdot P_{In}$
雑排水無処理	$\theta \exp(-K t_2) L_1 \cdot$ $(J_n - (P_{Gn} + P_{Sn} + P_{In}))$

表3 観測基点におけるし尿起因BOD負荷量(g/d)

下水道	$(1 - \alpha_1) \exp(-K t_2) L_2 \cdot P_{Gn}$
公共腐敗槽	$(1 - \beta_1) \exp(-K t_2) L_2 \cdot P_{Sn}$
個別処理維持管理良好	$\theta (1 - \gamma_1) \exp(-K t_2) L_2 \cdot P_{Kn} \cdot R_s \cdot R_L$
個別処理維持管理不良	$\theta \exp(-K t_2) L_2 \cdot \{P_{Bn} - P_{In} \cdot$ $U_{Bn} / (U_{Kn} + U_{Bn} + U_{Cn})\}$
公共トイレ	0
インターセプター下水道	$\theta (1 - \alpha_1) \exp(-K t_2) L_2 \cdot$ $P_{In} \cdot U_{Bn} / (U_{Kn} + U_{Bn} + U_{Cn})\}$

表4 観測基点におけるし尿起因糞便性大腸菌群負荷量(MPN/d)

下水道	$(1 - \alpha_2) (1 - r)^T L_3 \cdot P_{Gn}$
公共腐敗槽	$(1 - \beta_2) (1 - r)^T L_3 \cdot P_{Sn}$
個別処理維持管理良好	$\theta (1 - \gamma_2) (1 - r)^T L_3 \cdot P_{Kn} \cdot R_s \cdot R_L$
個別処理維持管理不良	$\theta (1 - r)^T L_3 \cdot \{P_{Bn} - P_{In} \cdot$ $U_{Bn} / (U_{Kn} + U_{Bn} + U_{Cn})\}$
公共トイレ	0
インターセプター下水道	$\theta (1 - \alpha_1) (1 - r)^T L_3 \cdot P_{In} \cdot$ $U_{Bn} / (U_{Kn} + U_{Bn} + U_{Cn})\}$
衛生処理システムなし	$\theta (1 - r)^T L_3 \cdot P_{Nn}$

α_1 : 処理場BOD処理効率

α_2 : 処理場糞便性大腸菌群処理効率

β_1 : 公共腐敗槽BOD処理効率

β_2 : 公共腐敗槽糞便性大腸菌群処理効率

γ_1 : 腐敗槽BOD処理効率

γ_2 : 腐敗槽糞便性大腸菌群処理効率

L_1 : 発生汚濁負荷量(雑排水BOD)〔g/d〕

L_2 : 発生汚濁負荷量(し尿BOD)〔個/d〕

L_3 : 発生汚濁負荷量(し尿糞便性大腸菌群)
〔個/d〕

K : 自浄係数〔1/d〕

t_2 : 河川流下時間〔d〕

T : 流下時間〔d〕、 θ : 流達率

r : 死滅係数

R_s : 個別処理にしろる腐敗槽の割合

R_L : 腐敗槽のうち浸透を伴う比率

4. 初期条件及び整備方針の設定

基準年の各処理システム使用人口についてはチレボン市の1982年当時の衛生処理システム使用状況³⁾をもとに初期条件設定し、以後の整備方針については表5に示す各種の代替案を設定した。公共トイレについては標準整備方針のみ行政側の負担は建設費だけで維持管理費は負担しないものと仮定し、処理が適切に行われているものの比率を2割と仮定した。それ以外の整備方針では公共トイレの建設費、維持管理費ともに行政側の負担とし、処理が適切に行われているものの比率を10割と仮定した。

表5 整備方針の設定

整備システムの概要		整備方針名と建設費の投資配分	
最重視	2番目に重視	20年間均一	最初の10年間に重点投資
下水道、公共トイレ		標準整備方針	—
下水道	—	整備方針1	整備方針6
公共トイレ	汚泥引き抜き補助	整備方針2	整備方針7
公共腐敗槽	インターセプター下水道	整備方針3	整備方針8
インターセプター下水道	汚泥引き抜き補助	整備方針4	整備方針9
下水道	各戸接続補助	整備方針5	整備方針10

5. 結果

シミュレーション結果を図3から図5に示す。

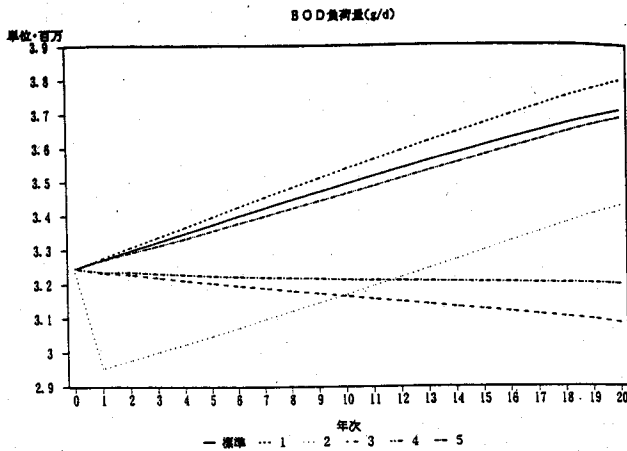


図3 BOD負荷量(1)

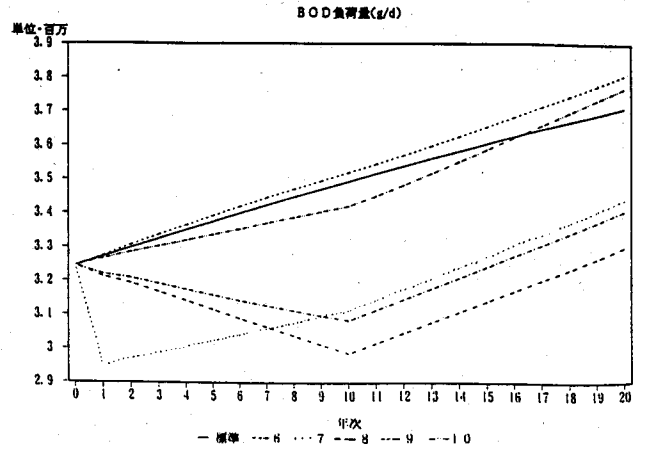


図3 BOD負荷量(2)

建設費を均一に割り振った整備方針1～5が最初の10年間に集中的に投資する整備方針6～10よりそれぞれ良い結果が出た。整備方針1～5では、公共腐敗槽の整備に重点をおいた場合(整備方針3)が最も良く、次いでインターセプター下水道整備(整備方針4)、公共トイレおよび汚泥引き抜き補助(整備方針2)の順となった。今回の設定では下水道整備は資金的な負担が大きすぎて整備が進まないという結果となった。これは逆の見方をすれば、人口密度その他の面から下水道整備が必要である地域をカバーするためには今回用いた予算設定では極めて不十分であり、環境衛生の改善に対してさらなる投資努力が必要であると読み替えることができよう。

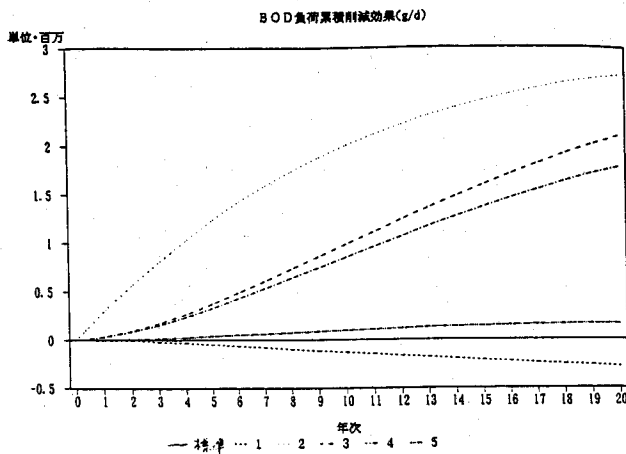


図4 BOD負荷量累積削減効果(1)

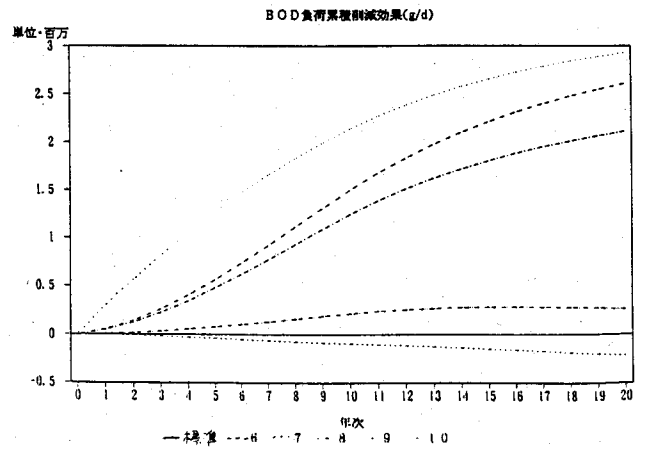


図4 BOD負荷量累積削減効果(2)

BOD負荷量の累積削減効果は、標準整備方針と比較した場合最初の10年間に重点投資をした整備方針6～10の方が良かった。これは便益評価の割引率を10%に設定し、効果が早く現れる方が高い評価を得るようにしたためである。また図5の糞便性大腸菌群負荷量は図3のBOD負荷量と概ね同様の結果となったが、雑排水起因の糞便性大腸菌群の影響を無視したため、整備方針2の改善効果がBOD負荷量のときよりも大きくなった。なお、糞便性大腸菌群累積削減効果についてはBOD負荷量と同様の傾向となった。

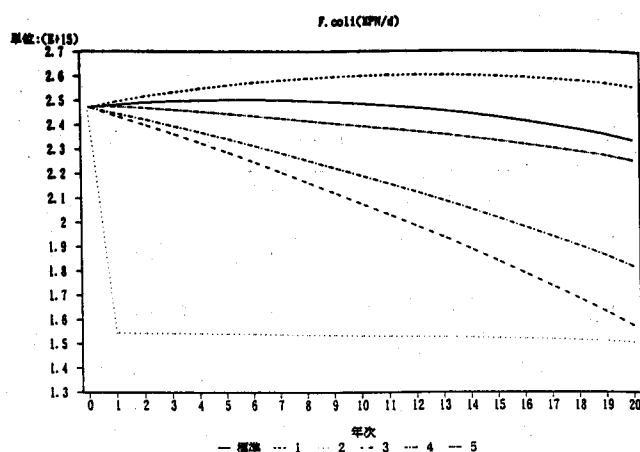


図5 糞便性大腸菌群負荷量(1)

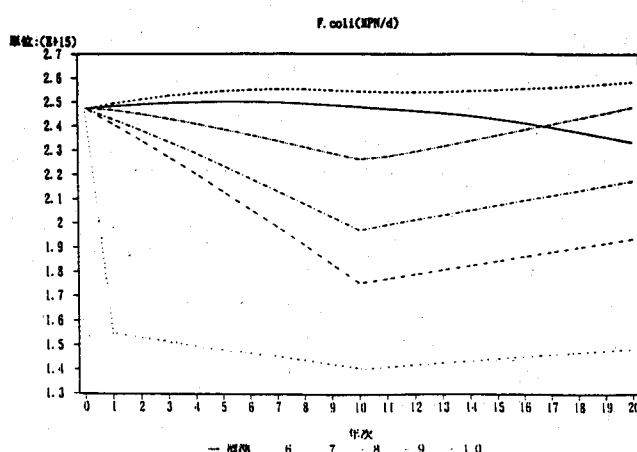


図5 糞便性大腸菌群負荷量(2)

6. 結論

本報では、行政側の支出によるし尿・生活排水処理施設整備の各種代替案の効果を定量的に表すため、シミュレーションモデルを開発し提示した。本報で示した計算結果は、シミュレーションモデルにおいて多くの仮定式及び仮定値を用いているので、実際の整備計画の効果を必ずしも正しく示したものではない。しかし、以下にあげる事項を改善していくことにより、行政側の施設整備計画を段階的、効率的に実施するうえでの判断材料を定量的に提示し得ると言える。

- (1) 井戸水を利用することの多い途上国において、地下水の水質確保は重要である。代替案に腐敗槽やリーチングピットのような土壌浸透処理を想定しているので、地下水の汚濁解析を組み入れる。
- (2) 保健衛生、環境保全という2つの面を統合的に評価するために統一的な指標を開発する。例えば、便益として経済的価値に換算する方法が考えられる。
- (3) 他の地域への適用を可能にするために、モデル地域特有の条件と、一般化できる部分を明確化する。
- (4) 途上国の実態調査を進めることにより、より適応性のある仮定式に適宜組み替えるとともに、仮定値を実測値で置き換えるべく途上国でのデータの蓄積を図る。

【参考文献】

- 1 小嶋ら(1993) 開発途上国におけるし尿・生活排水の段階的改善計画手法の開発に関する研究(1) -インドネシア国における現状と問題点-
- 2 インドネシア公共事業省(1989) Preparation of National Strategic Plan for the Human Waste and Wastewater Disposal Sub-Sector for Urban Areas, Final Report Volume 2, Strategic Guidelines and Design Criteria
- 3 アルピンコンサルタント(1982) CUDP II マスタープラン Vol.1
- 4 アルピンコンサルタント(1982) CUDP II マスタープラン Vol.3
- 5 インドネシア公共事業省(1991) Second Bandung Urban Development Project Sewerage Sector Review Study
- 6 インドネシア公共事業省(1990) CWSP -Review of Urban Sanitation Experience
- 7 インドネシア公共事業省(1992) チレボン市の汚水処理システムレポート
- 8 日本下水道協会(1993) 流域別下水道整備総合計画調査 -指針と解説-
- 9 日本下水道協会(1985) 下水道事業財政モデルの概要-下水道事業財政モデル作成に関する調査結果-
- 10 J. ルイス他(1980) The Risk of Groundwater Pollution by On-site Sanitation in Developing Country - A Literature Review -
- 11 世界銀行(1986) Information and Training for Low-cost Water Supply and Sanitation
- 12 WHO(1984) The International Drinking Water Supply and Sanitation Decade, Review of National Baseline Data(1980)
- 13 WHO(1992) The International Water Supply and Sanitation Decade, End of Decade Review(1990)
- 14 WHO(1992) World Health Statistics Annual