整数計画法を用いた開発途上国における 無収水対策選択モデルの構築

松本 重行¹・北脇 秀敏²

¹正会員 独立行政法人国際協力機構 (〒102-8012 東京都千代田区二番町5-25)

E-mail:Matsumoto.Shigeyuki@jica.go.jp

²正会員 東洋大学教授 国際地域学部国際地域学科 (〒112-0001 東京都文京区白山5-28-20)

E-mail:kitawaki@toyo.jp

開発途上国の多くの水道事業体では、水道料金請求の対象とならない無収水が多く、水道事業経営を圧迫し、施設整備や水道サービスの改善が進まない大きな要因となっている。本研究では、途上国における無収水の原因構成や資金制約、無収水対策の費用、効果、及び効果の減衰を考慮に入れた無収水対策選択モデルを構築し、整数計画法を用いた最適化計算を行うことによって、望ましい無収水対策の選択を行う手法を検討した。構築したモデルにより、水道事業体が置かれている事業環境や資金制約などの条件を設定することで、制約条件を満たす最適な対策手法を選択することが可能となり、対策手法の選択に影響を与える因子が明らかになった。

Key Words : non-revenue water, developing countries, integer programming, optimization

1. はじめに

世界保健機関 (WHO) と国際連合児童基金 (UNICEF) によれば、2015年時点で世界には安全な水にアクセスできない人々が6.63億人残されている。途上国で水道を利用している人口は2015年時点で全人口の49%と推定されており、後発開発途上国では12%に過ぎない¹⁾。さらに、途上国の水道の多くは、24時間給水ではない、水質基準が満たされていない、水圧が低いなど、水道サービスの観点からも多くの問題を抱えている。

水道普及率の向上や水道サービスの改善には、施設投資や維持管理のための予算が必要であるが、途上国の水道事業体は経営状態が悪く、これらの予算を適切に確保することが困難である。その原因としては、政策的に低く抑えられた水道料金水準や、高い無収水率が挙げられる。水道料金は政治的に値上げが困難であることが多いのに対し、無収水は水道事業体自身の取組によって削減することが可能であり、途上国に対する国際協力においても多くのプロジェクトの事例がある。

無収水量とは、水道システムに投入された水量のうち料金請求の対象とならなかった水量であり、漏水などの実損失水量や、違法接続 (盗水) や水道メーター誤差に起因する見掛け損失水量等、様々な形でロスが含まれる²⁾。日本の上水道事業全体の無収水率は2012年度で

9.94%と低い³⁾、途上国では平均約35%というデータがあり、データが取得できないような事業体も含めると40~50%程度になる可能性があるとの推定もある⁴⁾。途上国において無収水削減は、水道料金収入を増やし、経営を改善するための極めて重要な手段である。

無収水に関する研究は、1970~80年代に実損失に関する分析が英国を中心に進み、1990年代後半から国際水協会 (IWA) を中心に見掛け損失も含む定義や対策の体系化が進められた⁵⁾。また、Wyattが途上国を対象に無収水対策の経済的な最適化を検討したモデルを構築しているが、定常状態において維持すべき経済的な無収水量のレベルやそのために必要な維持管理費用を議論したものである⁶⁾。無収水を削減するための対策の最適化については、先進国で問題となる漏水対策の経済的な最適化を検討した事例があるが、見掛け損失も含めて、途上国を対象として研究された事例は少ない。途上国の無収水には様々な原因があり、取り得る対策も多様であるが、対策予算の制約がある中で、どのように対策を組み合わせるのが効果的かは明らかでなく、我が国の国際協力でも、個々の水道事業体でパイロットプロジェクトを通じて無収水の原因構成の把握と各対策の費用対効果の分析を行うという時間と費用のかかる方法を取っている。

そこで本研究では、途上国の水道事業の無収水の特徴を踏まえ、無収水削減対策の実施数量 (以下、対策数量

と呼ぶ)を変数とする無収水対策選択モデルを構築し、整数計画法を用いた最適化計算によって、無収水削減対策の望ましい組み合わせを得る方法を提案し、結果に影響を与える因子を明らかにすることを目的とした。

2. 無収水対策選択モデルの構築

(1) モデルの考え方

構築するモデルは、無収水対策数量を変数とし、無収水量を計算する目的関数と制約条件式を与え、無収水量を最小化する対策数量を明らかにするものである。目的関数を無収水量としたのは、水道事業体のパフォーマンス・インディケーターとして多用されているためである。対策数量はメーター更新数、違法接続の正規接続化数、漏水探知・修理数など整数を取るものが多いため、最適化計算には変数を整数とする整数計画法を用いた。

モデルは以下のような点を反映できるように構築する。

- 無収水量は、メーター設置率、違法接続の多寡、使用管種、平均水圧など、水道事業体が置かれている施設条件をパラメーターとして計算される。
- 無収水量は、対策を講じなかった場合、メーターや水道管の経年劣化、違法接続の増加などにより、増加する。メーターや水道管を更新すると無収水量を削減することができるが、経年劣化により無収水削減効果は減衰する。
- 漏水が中心の先進国と異なり、途上国では見掛け損失も多く、無収水の発生原因構成が多様である。
- 多様な無収水の発生原因構成に応じて対策も多様であり、各対策によって必要な費用や無収水削減効果、効果の減衰などが異なる。
- 途上国の水道事業体が無収水対策に投資できる予算には制約がある。

(2) 検討の対象とする無収水の区分と対策

以下の説明で用いるパラメーターの一覧を表-1に示す。本論文では、無収水を表-2 (IWAの配水量分析表²⁾を筆者一部改変) に示すものと定義した。IWAは有収水を表-2のA~I、無収水をU~Kと区分している。このうち本研究では、水道事業体の努力によって削減が可能であり、途上国において主要な原因となっている無収水をモデル化の対象にすることとし、表-3に示すI-2, O, K, Y, Zの区分と対策を検討の対象とした。

請求非計量給水量 (I) はIWAでは有収水に分類されるが、メーターがついていないため実際の使用水量の多寡に拘わらず定額で水道料金が請求されているケースが含まれる。このような場合、請求された定額の水道料金が、仮に従量制であった場合にはいくらの水使用量に相

表-1 パラメーター一覧

i	無収水対策の種類。i=1:メーターの更新, i=2:メーターの設置, i=3:違法接続の正規化, i=4:送配水管の更新, i=5:送配水管の漏水探知・修理, i=6:給水管の更新, i=7:給水管の漏水探知・修理
j	基準年からの経過年数。本研究では5年経過後の無収水量の最小化を目的関数とし, j=1, 2, 3, 4, 5。j=0は初期条件を表す。
k	管種
t	メーター, 送配水管, 給水管の材齢 (年)
B _j	j年の無収水対策予算 (円)
C1	管路推定事故率の仕様に関する補正係数
C2	管路推定事故率の口径に関する補正係数
C3	管路推定事故率の地盤条件に関する補正係数
C4	管路推定事故率の途上国における給水管の事故発生率を反映した補正係数
L _j	j年における材齢t年の送配水管の延長 (km)
LBGD _j	j年の送配水管からの探知困難な漏水量 (m ³ /年)
LBGS _j	j年の給水管からの探知困難な漏水量 (m ³ /年)
LD _j	j年の送配水管からの漏水による無収水量 (m ³ /年)
LI _j	j年の非認定給水量による無収水量 (m ³ /年)
LM _j	j年のメーター故障に起因する計量誤差による無収水量 (m ³ /年)
LN _j	j年のメーター未設置に起因する認定誤差による無収水量 (m ³ /年)
LRBD _j	j年の送配水管破裂事故の漏水量 (m ³ /年)
LRBS _j	j年の給水管破裂事故の漏水量 (m ³ /年)
LS _j	j年の給水管 (メーター上流側) からの漏水による無収水量 (m ³ /年)
LT _j	j年の送配水管総延長 (km)
LUGD _j	j年の送配水管地下漏水の漏水量 (m ³ /年)
LUGS _j	j年の給水管地下漏水の漏水量 (m ³ /年)
NC _j	j年における材齢t年の給水管の接続数
NCT	接続数合計
NIC _j	j年の違法接続数
NMF _j	j年における材齢t年の稼働メーター数
NMN _j	j年の故障メーター数
NNM _j	j年のメーター未設置数
NRW _j	j年の無収水量 (m ³ /年)
NUGD _j	j年の送配水管地下漏水箇所数
NUGS _j	j年の給水管地下漏水箇所数
P	平均水圧 (m)
TD _j	j年に存在する送配水管の最も古い材齢 (年)
TF	送配水管, 給水管の破裂事故による漏水の修理に要する時間 (hr)
TM _j	j年に存在するメーターの最も古い材齢 (年)
TS _j	j年に存在する給水管の最も古い材齢 (年)
UC _i	対策の単価 (円)
UIC	違法接続1か所当たりの無収水量 (m ³ /年)
UL	1接続当たりの給水管単位延長 (m)
ULBGD	送配水管からの探知困難な漏水量原単位 (m ³ /管路延長 (km) / 日 / 水圧 (m))
ULBGSC	給水管1接続当たりの探知困難な漏水量原単位 (m ³ /接続 / 日 / 水圧 (m))
ULBGSL	給水管延長1km当たりの探知困難な漏水量原単位 (m ³ /管路延長 (km) / 日 / 水圧 (m))
ULRBD	破裂事故による送配水管からの漏水量原単位 (m ³ /時間 (hr) / 水圧 (m))

ULRBS	破裂事故による給水管からの漏水量原単位 ($\text{m}^3/\text{時間 (hr)} / \text{水圧 (m)}$)
ULUGD	地下漏水による送配水管からの漏水量原単位 ($\text{m}^3/\text{時間 (hr)} / \text{水圧 (m)}$)
ULUGS	地下漏水による給水管からの漏水量原単位 ($\text{m}^3/\text{時間 (hr)} / \text{水圧 (m)}$)
UMN	故障メーター1個当たりの無収水量 ($\text{m}^3/\text{年}$)
UNM	メーター未設置1か所当たりの無収水量 ($\text{m}^3/\text{年}$)
W_i	対策iの年間実施上限数量
X_j	j年における対策の実施数量. $i=1$: 個, $i=2, 3, 5$: 箇所数, $i=4$: 更新延長 (m), $i=6, 7$: 接続数.
YD_i	材齢年の送配水管の推定事故率 (件/ $\text{km}/\text{年}$)
YS_i	材齢年の給水管の推定事故率 (件/ $1,000\text{接続}/\text{年}$)
f_a	管種kの材齢年における標準事故率
m	ワイブル分布の形状パラメーター
γ	ワイブル分布の位置パラメーター
η	ワイブル分布の尺度パラメーター
λ_t	t年経過したメーターの故障率

表-2 配水量分析表

配水量内訳				パラメーター	区分
配水量	認定給水量	請求認定給水量	ア 請求計量給水量	—	有収水量
			イ 請求非計量給水量	—	
			イ-1. 認定分	—	
			イ-2. 認定誤差分	LN_j	
	非請求認定給水量	ウ 非請求計量給水量 (消火用水等)	—	—	無収水量 NRW_j
			エ 非請求非計量給水量 (事業用水等)	—	
	損失水量	見掛け損失水量	オ 計量誤差 (メーター不感, 誤差)	LM_j	
			カ 非認定給水量 (違法接続)	LI_j	
		実損失水量	キ 送配水管からの漏水	LD_j	
			ク 配水池からの漏水・越流	—	
			ケ 給水管 (メーター上流側) からの漏水	LS_j	

表-3 検討対象とする無収水の区分と対策

無収水の区分	対策	対策 X_i の i
イ-2 請求非計量給水量の認定誤差分 LN_j	メーターの設置	i=2
オ 計量誤差 LM_j	メーターの更新	i=1
カ 非認定給水量 LI_j	違法接続の摘発と正規接続化	i=3
キ 配水管からの漏水 LD_j	老朽送配水管の更新	i=4
	送配水管の漏水探知・修理	i=5
ケ 給水管 (メーター上流側) からの漏水 LS_j	老朽給水管の更新	i=6
	給水管の漏水探知・修理	i=7

当するか (見なし使用水量) を計算すると, 実際の使用水量よりも少ないことが一般的である. すなわち, 請求非計量給水量 (イ) は定額請求により料金請求の対象になっている認定分の水量と, 実際の使用水量と認定水量の差である認定誤差分の水量に分けられ, 後者は実質的に無収水になっていると考えられる. 途上国ではメーターが設置されていないことも多く, このよう認定誤差分は無視できないため, 本研究では無収水量として扱い, 検討対象とした. 対策としては, 新規メーターの設置を目的関数の変数とした.

非請求計量給水量 (ウ) は, 消火用水, 管理用水等の調定水量であり, 水道事業者の努力による削減が困難であることから, 検討対象としない.

非請求非計量給水量 (エ) は管洗浄に用いる事業用水等で, 一般に少量であることから, 検討対象としない.

計量誤差 (オ) はメーター不感, 誤差, 誤検針等であり, 先進国ではメーターの精度低下が主に問題となるのに対し, 途上国では水道水質やメーターの品質が悪く, メーターの故障が大きな問題となる. そこで本研究では, メーターの故障に起因する無収水量を検討対象とし, その対策としてメーターの更新数を目的関数の変数とした.

非認定給水量 (カ) は違法接続 (盗水) やその他の不明水であり, 途上国においては違法接続が大きな問題となっている. よって, 検討対象に含めることとした.

送配水管からの漏水 (キ), 給水管からの漏水 (ケ) は, いずれも途上国で大きな問題であるため, 検討対象とし, 管の更新と漏水探知・修理を取り得る対策とした.

配水池からの漏水・越流 (ク) は一般に水量が少ないことから, 本研究では検討の対象外とした.

(3) 目的関数の設定

無収水量を計算する目的関数を以下のとおり記述する.

$$NRW_j = LM_j + LN_j + LI_j + LD_j + LS_j$$

NRW_j : j年の無収水量 ($\text{m}^3/\text{年}$)

LM_j : j年におけるメーター故障に起因する計量誤差による無収水量 ($\text{m}^3/\text{年}$)

LN_j : j年におけるメーター未設置に起因する認定誤差による無収水量 ($\text{m}^3/\text{年}$)

LI_j : j年における非認定給水量による無収水量 ($\text{m}^3/\text{年}$)

LD_j : j年における送配水管からの漏水による無収水量 ($\text{m}^3/\text{年}$)

LS_j : j年における給水管 (メーター上流側) からの漏水による無収水量 ($\text{m}^3/\text{年}$)

a) メーター故障による計量誤差

メーター故障による計量誤差 LM_j の計算式は, 信頼性工学で用いられるワイブル分布に基づくメーターの故障率を考慮に入れ, 以下のとおりとした.

$$LM_j = UMN \cdot NMN_j$$

$$NMN_j = NMN_{j-1} - X_{1j} + \sum_{t=1}^{TM_j-1} NMF_{(j-1)t} \cdot \lambda_t$$

$$\lambda_t = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{m-1}$$

LM_j : j年のメーター故障に起因する計量誤差による無収水量 (m³/年)

UMN : 故障メーター1個当たりの無収水量 (m³/年)

NMN_j : j年における故障メーター数

NMF_j : j年における材齢年の稼働メーター数

X_{1j} : j年における故障メーター更新対策数

TM_j : j年に存在するメーターの最も古い材齢 (年)

λ_t : t年経過したメーターの故障率。ワイブル分布を適用。

m : ワイブル分布の形状パラメーター

η : ワイブル分布の尺度パラメーター

γ : ワイブル分布の位置パラメーター

b) メーター未設置による認定誤差

メーター未設置による認定誤差LN_jの計算式は以下のとおりとした。

$$LN_j = UNM \cdot NNM_j$$

$$NNM_j = NNM_{j-1} - X_{2j}$$

LN_j : j年のメーター未設置に起因する認定誤差による無収水量 (m³/年)

UNM : メーター未設置1か所当たりの無収水量 (m³/年)

NNM_j : j年時点におけるメーター未設置数

X_{2j} : j年におけるメーター未設置世帯への新規設置数

c) 非認定給水量 (違法接続)

違法接続による非認定給水量LI_jの計算式は以下のとおりとした。ここで、違法接続は、市民の順法意識や管種 (違法な接続作業の容易さが異なる) 等によって多寡が影響され、摘発を行ってもまた増える傾向があることから、違法接続数初期値に対して一定の割合の数の違法接続が毎年増加すると仮定した。

$$LI_j = UIC \cdot NIC_j$$

$$NIC_j = NIC_{j-1} - X_{3j} + RIC \cdot NIC_0$$

LI_j : j年の非認定給水量 (m³/年)

UIC : 違法接続1か所当たりの無収水量 (m³/年)

NIC_j : j年における違法接続数

X_{3j} : j年における違法接続摘発・正規接続化数

RIC : 違法接続数初期値に対する毎年の違法接続増加率

NIC₀ : 違法接続数初期値

d) 送配水管からの漏水

IWAは、漏水量を地上に表れる漏水 (破裂事故) , 地上に表れないが探知可能な漏水 (地下漏水) , 探知困難な漏水の合計として推定することを提案している⁷⁾。

破裂事故の発生箇所数は、日本と途上国では使用している管材の質や施工技術に相違があると考えられるもの

の、途上国における調査事例がないため、日本における調査事例が示す事故率推定式⁸⁾を用いた。

$$YD_t = C1 \cdot C2 \cdot C3 \cdot f_{kt}$$

YD_t : 材齢年の送配水管の推定破裂事故率 (件/km/年)

C1 : 仕様に関する補正係数

C2 : 口径に関する補正係数

C3 : 地盤条件に関する補正係数

f_{kt} : 管種kの材齢における標準事故率

地下漏水の年間新規発生箇所数は、破裂事故の発生箇所数と同数と仮定した。無収水対策として送配水管の更新を行うと管が新しくなり、事故率低下により破裂事故と地下漏水の双方が減少する。無収水対策として漏水探知・修理作業を行うと、地下漏水箇所数が修理箇所数だけ減少する。

以上より、送配水管からの漏水LD_jの計算式は以下のとおりとした。

$$LD_j = LRBD_j + LUGD_j + LBGD_j$$

$$LRBD_j = ULRBD \times TF \cdot P \cdot \sum_{t=1}^{TDj} YD_t \cdot L_{jt}$$

$$LUGD_j = ULUGD \times 24 \times 365 P \cdot NUGD_j$$

$$NUGD_j = NUGD_{j-1} - X_{5j} - \frac{X_{4j}}{1000} \cdot YD_{TDj}$$

$$+ \sum_{t=1}^{TDj-1} YD_t \cdot L_{(j-1)t}$$

$$LBGD_j = ULBGD \times 365 \times P \cdot LT_j$$

LD_j : j年の送配水管からの漏水量 (m³/年)

LRBD_j : j年の送配水管破裂事故の漏水量 (m³/年)

TF : 破裂事故による漏水の修理に要する時間 (hr)

LUGD_j : j年の送配水管地下漏水の漏水量 (m³/年)

LBGD_j : j年の送配水管の探知困難な漏水量 (m³/年)

ULRBD : 破裂事故による送配水管からの漏水量原単位 (m³/時間 (hr) / 水圧 (m))

ULUGD : 地下漏水による送配水管からの漏水量原単位 (m³/時間 (hr) / 水圧 (m))

ULBGD : 送配水管からの探知困難な漏水量原単位 (m³/管路延長 (km) / 日 / 水圧 (m))

P : 平均水圧 (m)

NUGD_j : j年の送配水管地下漏水箇所数

X_{4j} : j年の送配水管更新対策実施延長 (m)

X_{5j} : j年の送配水管漏水探知・修理数

YD_t : 材齢 t 年の送配水管推定破裂事故率 (件/km/年)

L_{jt} : j年における材齢 t 年の送配水管の延長 (km) (初期条件, 経年劣化, 及び無収水対策として送配水管更新が行われる場合の更新延長X_{4j}を考慮して計算する)

LT_j : j年の送配水管総延長 (km)

TD_j: j年で存在する送配水管の最も古い材齢 (年)

e) 給水管からの漏水

IWAは、給水管からの漏水量も送配水管からの漏水量と同様に、地上に表れる漏水 (破裂事故)、地上に表れないが探知可能な漏水 (地下漏水)、探知困難な漏水の合計として推定することを提案している⁷⁾。

破裂事故の発生箇所数は、送配水管の日本における調査事例が示す事故率推定式⁹⁾を用い、途上国における給水管の事故発生率を反映した補正係数を設定した。

$$YS_t = C1 \cdot C2 \cdot C3 \cdot C4 \cdot f_{kt}$$

YS_t: 材齢t年の給水管の推定破裂事故率 (件/1,000接続/年)

C1: 仕様に関する補正係数

C2: 口径に関する補正係数

C3: 地盤条件に関する補正係数

C4: 途上国における給水管の事故発生率を反映した補正係数

f_k: 管種kの材齢lにおける標準事故率

地下漏水の年間新規発生数は、破裂事故発生数と同数と仮定した。無収水対策として給水管の更新を行うと管が新しくなり、事故率低下により、破裂事故と地下漏水の双方が減少する。無収水対策として漏水探知・修理作業を行うと、地下漏水箇所数が修理箇所数だけ減少する。

以上より、給水管からの漏水LS_jの計算式は以下のとおりとする。

$$LS_j = LRBS_j + LUGS_j + LBGS_j$$

$$LRBS_j = ULRBS \times TF \cdot P \cdot \sum_{t=1}^{TS_j} YS_t \cdot NC_{jt}$$

$$LUGS_j = ULUGS \times 24 \times 365 P \cdot NUGS_j$$

$$NUGS_j = NUGS_{j-1} - X_{7j} - X_{6j} \cdot YS_{TS_j}$$

$$+ \sum_{t=1}^{TS_{j-1}} YS_t \cdot NC_{(j-1)t}$$

$$LBGS_j = \left(ULBGSC \cdot NCT + ULBGSL \times \frac{UL \cdot NCT}{1000} \right) \times 365 P$$

LS_j: j年の給水管からの漏水量 (m³/年)

LRBS_j: j年の給水管破裂事故の漏水量 (m³/年)

TF: 破裂事故による漏水の修理に要する時間 (hr)

LUGS_j: j年の給水管地下漏水の漏水量 (m³/年)

LBGS_j: j年の給水管の探知困難な漏水量 (m³/年)

ULRBS: 破裂事故による給水管からの漏水量原単位 (m³/時間 (hr) / 水圧 (m))

ULUGS: 地下漏水による給水管からの漏水量原単位 (m³/時間 (hr) / 水圧 (m))

ULBGSC: 給水管1接続当たりからの探知困難な漏水量

原単位 (m³/接続/日/水圧 (m))

ULBGSL: 給水管延長1km当たりからの探知困難な漏水量原単位 (m³/管路延長 (km) / 日/水圧 (m))

P: 平均水圧 (m)

NUGS_j: j年の給水管地下漏水箇所数

X_{6j}: j年の給水管更新対策数 (接続)

X_{7j}: j年の給水管漏水探知・修理数 (接続)

YS_t: 材齢t年の給水管の推定破裂事故率 (件/1,000接続/年)

NC_{jt}: j年における材齢t年の給水管の接続数 (初期条件、経年劣化、及び無収水対策として給水管更新が行われる場合の更新接続数X_{6j}を考慮して計算する)

NCT: 接続数合計

TS_j: j年時点で存在する給水管の最も古い材齢 (年)

UL: 1接続当たりの給水管単位延長 (m)

(4) 制約条件式の設定

整数計画法に用いる実行可能領域を定義するため、以下のとおり制約条件式を設定する。

a) メーター故障による計量誤差

j年のメーター更新数X_{1j}は、j-1年の故障メーター数を超えない範囲とする。また、途上国では技術者が少なく、工事監理の能力にも制約があるため、動員できる人員や作業班の数には限りがあり、年間の対策実施数量にも制約があると考えられる。この点を考慮した場合の年間対策実施上限数量W₁を超えない範囲とする。

$$X_{1j} \leq NMN_{j-1}$$

$$X_{1j} \leq W_1$$

b) メーター未設置による計量誤差

j年のメーター設置数X_{2j}は、j-1年のメーター未設置数を超えない範囲とする。また、上述の人員等の制約を考慮した場合の年間対策実施上限数量W₂を超えない範囲とする。

$$X_{2j} \leq NNM_{j-1}$$

$$X_{2j} \leq W_2$$

c) 非認定給水量 (違法接続)

j年の違法接続対策数X_{3j}は、j-1年での違法接続数を超えない範囲とする。また、人員等の制約を考慮した場合の年間対策実施上限数量W₃を超えない範囲とする。

$$X_{3j} \leq NIC_{j-1}$$

$$X_{3j} \leq W_3$$

d) 送水管・配水管からの漏水

j年の送配水管更新延長X_{4j} (単位はm) は、作業の所要時間を考慮した場合の年間対策実施上限数量W₄を超えない範囲とする。j年の送配水管地下漏水探知・修理箇所数X_{5j}は、j-1年での地下漏水箇所数、及び人員等の制約を考慮した場合の年間対策実施上限数量W₅を超えない範囲とする。

$$X_{4j} \leq W_4$$

$$X_{5j} \leq NUGD_{j-1}$$

$$X_{5j} \leq W_5$$

e) 給水管からの漏水

j年の給水管更新接続数 X_{6j} は、作業の所要時間を考慮した場合の年間対策実施上限数量 W_6 を超えない範囲とする。j年の給水管地下漏水探知・修理箇所数 X_{7j} は、j-1年での地下漏水箇所数、及び人員等の制約を考慮した場合の年間対策実施上限数量 W_7 を超えない範囲とする。

$$X_{6j} \leq W_6$$

$$X_{7j} \leq NUGS_{j-1}$$

$$X_{7j} \leq W_7$$

f) 予算制約

各対策iの単価 UC_i に対策数量 X_{ij} をかけて算出した各年の対策費用が、各年の予算 B_j を超えないこととする。

$$\sum_{i=1}^7 X_{ij} \cdot UC_i \leq B_j$$

3. 途上国の大都市を想定した入力値の設定

本研究では、無収水対策の最適選択に影響を与えると考えられる要因として、対策予算と施設条件を検討した。施設条件としては、筆者らがメーターの設置が十分でない途上国の大都市を想定してパラメーター入力値を設定した基本シナリオとした。また、違法接続初期値、メーター設置数初期値、送配水管総延長、送配水管の管種、平均水圧を変化させて分析を行った。固定したパラメーターは、途上国を想定して設定した。モデルへの入力値は、表-4のとおりとした。

表-4 パラメーター入力値一覧

k: 管種	途上国で多く使われている管種として、給水管は硬質塩化ビニル管 (VP) とした。配水管は基本シナリオをVPとし、鋳鉄管 (CIP) の場合を加えた2つのシナリオを設定した。
B_j : j年の無収水対策予算 (円)	途上国では5年程度の開発計画を立案し、計画立案時に予算配分も検討することが一般的であるため、jによらず毎年同額とした。予算の多寡の影響を分析するため、水道料金を途上国の水準に照らして30円/㎡として、初期状態における水道料金収入を計算し、その1%相当額から10%相当額まで1%きざみで変化させた。
CI: 管路推定事故率の仕様に関する補正係数	文献 ⁸⁾ ではCIPについては設定がないため、1.0とした。VPは継手によって異なる値をとるが、途上国の施工品質、資材品質を考慮し、最も大きい1.0とした。
C2: 管路推定事故率の口径に関する補正係数	送配水管は、最も使用頻度が高いと考えられる口径100mmで代表することとし、文献 ⁸⁾ よりVPは1.4、CIPは1.0とした。給水管は、文献 ⁸⁾ では口径75mmの場合1.0、口径50mmの場合0.8とされているが、給水管はさらに口径が小さいことが多いため、0.6とした。
C3: 管路推定事故率の地盤条件に関する補正係数	良い地盤を仮定し、1.0とした。
C4: 管路推定事故率の途上国における給水管の事故発生率のデータは、1,000接続当たりの事故発生数として、ウガンダの首都カンパラで131件 ⁹⁾ 、ブラジルのサンパウロで69件 ¹⁰⁾ などの調査事例がある。これらの水準に合うよう、C4は700とした。	
LT _j : j年の送配水管総延長 (km)	我が国の98事業体のデータ ¹¹⁾ 及びアフリカ30都市のデータ ¹²⁾ を元に、人口100万人の都市に相当する延長として5,000kmを基本シナリオとし、3,000km、7,000kmの場合を加えた3つのシナリオを設定し、jによらず一定とした。
NCT: 接続数合計	人口100万人の都市を想定し、接続数合計は20万とした。
NIC _j : j年時点における違法接続数	途上国の実態から、基本シナリオの初期値NIC ₀ を接続数合計NCTの5%とし、10%、1%の場合を加えた3つのシナリオを設定した。
NMF _j : j年時点における材齢t年の稼働メーター数	メーター設置数に対して故障率を考慮し、稼働メーター数と故障メーター数を計算した。初期値NMF _{0t} は、初期故障率を0.2として計算した。
NNM _j : j年のメーター未設置数	メーター未設置率の初期値を、基本シナリオでは25%とし、0%、50%の場合を加えた3つのシナリオを設定した。
NUGD _j : j年の送配水管地下漏水箇所数	初期値NUGD ₀ は、送配水管総延長Lが材齢TD ₀ になるまでの累積地下漏水箇所数を計算して与えた。
NUGS _j : j年の給水管地下漏水箇所数	初期値NUGS ₀ は、給水管接続数NCTが材齢TS ₀ になるまでの累積地下漏水箇所数を計算して与えた。
P: 平均水圧 (m)	基本シナリオを40mとし、20m、60mの場合を加えた3つのシナリオを設定した。
TD _j : j年の送配水管の最も古い材齢 (年)	初期値TD ₀ は10年とした。
TF: 破裂事故による漏水の修理に要する時間 (hr)	途上国における実績水準 ¹³⁾ から、24時間とした。
TM _j : j年のメーターの最も古い材齢 (年)	初期値TM ₀ は5年とした。
TS _j : j年の給水管の最も古い材齢 (年)	初期値TS ₀ は5年とした。
UC ₁ : メーター更新の単価 (円)	対策コストはメーターの費用とし、途上国の実績水準から1,500円/個とした。
UC ₂ : メーター設置の単価 (円)	対策コストはメーター、メーターボックス、施工の合計とし、途上国の実績水準から6,300円/箇所とした。

UC ₃ : 違法接続対策の単価 (円)	対策コストはメーターの費用、メーターボックスの費用、施工費用の合計とし、途上国の実績水準から6,300円とした。違法接続者を説得するための人件費は既存人員での対応が一般的であり、追加コストとは考えないこととした。	W ₄ : 送配水管更新の年間対策実施上限数量	送配水管の施工速度を20m/日/班と仮定し、年間250日、20班の稼働を想定し、100,000mとした。
UC ₄ : 送配水管更新の単価 (円)	途上国の施工費用の実績水準から、VPは6,000円/m、CIPは10,000円/mとした。	W ₅ : 送配水管漏水探知・修理の年間対策実施上限数量	1班が1日2箇所を修理できると仮定し、年間250日、4班の稼働を想定し、2,000箇所とした。
UC ₅ : 送配水管漏水探知・修理の単価 (円)	途上国における実績水準から、5,000円/箇所とした。	W ₆ : 給水管更新の年間対策実施上限数量	1班が1日2接続を更新できると仮定し、年間250日、20班の稼働を想定し、10,000接続とした。
UC ₆ : 給水管更新の単価 (円)	途上国における施工費用の実績水準から、7,000円/接続とした。	W ₇ : 給水管漏水探知・修理の年間対策実施上限数量	1班が1日4箇所を修理できると仮定し、年間250日、4班の稼働を想定し、4,000箇所とした。
UC ₇ : 給水管漏水探知・修理の単価 (円)	途上国における実績水準から、2,000円/箇所とした。	f _k : 管種別の標準事故率曲線	文献 ⁸⁾ に従い、以下のとおりとした。 k=VPの時、 $f_{kt} = 1.27 \times 10^{-5} t^{2.907}$ k=CIPの時、 $f_{kt} = 1.91 \times 10^{-12} t^{6.502}$
UIC: 違法接続1か所当たりの無収水量	1接続当たりの水使用量を600m ³ /年の全量が無収水になるとした。	m: ワイブル分布形状パラメーター	途上国におけるメーター故障率が20～40%に及ぶ実態 ^{16) 17) 18)} に合うよう以下のとおり設定した。 初期故障要因: 0.1 偶発故障要因: 1 摩耗故障要因: 5
UL: 1接続当たりの給水管単位延長 (m)	途上国における事業計画例 ¹⁴⁾ から、5mとした。	η: ワイブル分布尺度パラメーター	mと同様に、以下のとおり設定した。 初期故障要因: 100 偶発故障要因: 100 摩耗故障要因: 20
UMN: 故障メーター1個当たりの無収水量 (m ³ /年)	アジア主要都市 ¹⁵⁾ 及びアフリカ30都市 ¹²⁾ の実績水準から、1接続当たりの水使用量を600m ³ /年とし、この50%が無収水になると仮定した。	γ: ワイブル分布位置パラメーター	故障開始時点を示すパラメーターであるため、0とした。
UNM: メーター未設置1か所当たりの無収水量 (m ³ /年)	1接続当たりの水使用量600m ³ /年の50%が無収水になると仮定した。		

表-5 各無収水対策の投入予算1万円当たりの無収水削減量	
無収水対策	投入予算1万円当たりの無収水削減量 (m ³ /年)
水道メーター更新	2,000
水道メーター設置	476
違法接続対策	952
送配水管更新	3
送配水管漏水探知・修理	84,096
給水管更新	34
給水管漏水探知・修理	56,064

この時、各無収水対策への投入予算1万円当たりの無収水削減量は、表-5のようになる。

4. 無収水対策の選択に関する考察

無収水対策の最適案は、前章で述べた制約条件式の下で、整数計画法により無収水量NRW_jを最小化する非負整数X_jを求めることで得られる。非商用ソルバーとしては最も高速なものの1つであるSCIP¹⁹⁾を用いて計算した。

(1) 予算制約の影響

前章で設定した基本シナリオを用い、無収水対策予算B_jを変化させた場合に、5年後の無収水量NRW₅を最小化する最適化計算を行った。これは、途上国では一般に5年間程度の開発計画を立案して政策を実行することが多いためであり、短期的に優先して実施すべき無収水対策

を検討することとなる。各対策は効果の減衰が異なるため、実施順序が無収水削減量に影響する可能性があると考え、途中年の対策実施数も計算した。基本シナリオにおける無収水量の初期値は、表-6のとおり計算される。メーターの設置が十分でないため、見かけ損失水量が無収水量の大部分を占めている。また、この時の無収水率と料金収入の計算を表-7に示す。初期水道料金収入に対するB₁の割合を予算投入率と定義し、予算投入率を1%から10%まで1%きざみで変化させて計算した。この時各対策に配分された予算の割合を、予算投入率が1%、5%、10%の場合について図-1に示す。

予算投入率の大小により、最適対策の選択は大きく変わることが分かった。予算投入率が1%と小さい場合には、違法接続対策やメーター更新に予算を重点的に配分し、予算投入率が10%に増えるにつれて、メーター設置、給水管更新、配水管更新などにも予算を配分することが妥当であることが明らかとなった。

しかし、図-1は各対策に充当される予算額の割合を示しているため、例えば漏水修理は予算配分が少なく優先度が低いように見えるが、実際には漏水箇所のほとんどを修理する結果になっている。このように予算配分は必ずしも各対策の優先順位を示すものではない。そこで5年間で取り得る対策数量の上限値に対する実際に選択された対策数量の割合を図-2に示す。割合が大きいくほど、その対策が優先的に選択されていることになる。5年間の対策可能数量の上限値は表-8に示すとおりである。

図-2から、予算投入率が小さい場合でも優先的に選択されている対策は、送配水管漏水修理、給水管漏水修理、

表-6 基本シナリオにおける無収水量の初期値 (千m³/年)

メーター故障	9,000	見掛け損失	30,000	無収水量 合計
メーター未設置	15,000			
違法接続	6,000			
地上漏水	17	配水管 漏水	10,010	実損失 14,354
地下漏水	9,293			
探知困難な漏水	701	給水管 漏水	4,344	44,354
地上漏水	4			
地下漏水	2,355			
探知困難な漏水	1,986			

表-7 基本シナリオ初期値の無収水率と料金収入の計算

有効水量 (千m ³ /年)	120,000	水使用量×人口
無効水量 (千m ³ /年)	14,354	表-6の実損失
水道システムへの投入水量 (千m ³ /年)	134,354	有効水量+無効水量
無収水率 (%)	33	無収水量/水道システムへの投入水量
有収水量 (千m ³ /年)	90,000	有効水量-表-6の見掛け損失
初期水道料金収入 (百万円)	2,700	有収水量×水道料金単価 (30円/m ³)

図-1 予算投入率が異なる場合の最適対策における予算配分

メーター更新、違法接続対策であることが分かる。

その後予算投入率が増えるにつれて、メーター設置、次いで給水管更新が選択されるようになる。なお、メーター更新は100%を超える値を示しているが、これは新たに設置されたメーターの故障にもすぐに対応して更新することが最適解となっているためである。また、予算投入率が小さいと給水管漏水修理が給水管更新よりも優先されるが、予算投入率が増えると更新の方が優先されるようになることが明らかになった。

これより、途上国においては無収水対策の選択において予算制約が大きく影響し、取るべき対策が異なることが分かった。また、先進国では漏水対策が中心となっているのに対し、途上国では見掛け損失に対する対策が重要であることが示された。途上国の水道事業体を想定した投資規模では、送配水管の更新に十分な投資を行うことが難しく、見掛け損失の削減で無収水を削減できても、いずれ実損失が急速に増大することが予想される。送配水管の更新には、外部からの援助や補助金によって適切に対応しなければならないであろう。

この時の無収水量の変化は、図-3のとおりである。予算投入率1%の投資を毎年行えば、無収水量を約10%削減することができる結果となった。また、予算投入率6%から10%では無収水量があまり変わらない結果となった。これは、図-2から分かったとおり、予算投入率6%以上の場合には送配水管更新以外の対策がほぼ上限値の数量で実施され、送配水管更新のみが漸増するが、コスト

表-8 5年間の対策実施可能数量上限値（基本シナリオ）

無収水対策	上限値	算出根拠
メーター更新 (個)	45,673	初期状態の設置メーターの4年目末時点での故障数。ただし、新規設置メーターに故障が発生するため、この上限値を上回る対策実績数となることがある。
メーター設置 (箇所)	50,000	初期条件のメーター未設置数
違法接続対策 (箇所)	12,000	初期値+4年目末までの経年増加数
送配水管更新 (m)	500,000	$W_4 \times 5$ 年
送配水管漏水探知・修理 (箇所)	782	初期条件の既存管の4年目末時点での漏水箇所数
給水管更新 (接続)	50,000	$W_6 \times 5$ 年
給水管漏水探知・修理 (接続)	1,795	初期条件の既存管の4年目末時点での漏水箇所数

図-2 予算投入率が異なる場合の各対策数量の上限値に対する割合

が高い対策であるため送配水管の総延長に対して対策実施数量は少ないこと、及び送配水管更新の効果は長期間に亘って発現するのに対して、今回は5年間の短期的な効果を検討していることが要因であると考えられる。この時の無収水量は約20百万 m^3 /年（無収水率は15～16%）であり、これ以上無収水を削減するためには、補助金、海外からの援助等によるまとまった送配水管更新予算の確保が必要であることを示唆している。無収水量の内訳をみると、違法接続、メーター未設置、メーター故障による見掛け損失水量が大幅に削減されたことが分かる。給水管からの漏水は、経年劣化で漏水箇所数が増加するのに対して、予算や年間対策実施上限数量の制約によって十分な対策ができず、漏水量が増えている。これより、水道料金収入を原資とした自己予算で無収水対策を進める場合、投入予算に制約があるため、見掛け損失対策を優先的に進めるべきであることや、対策予算が少なすぎると漏水の増加を抑えることができないことが分かる。

また、1年ごとの無収水削減量に水道料金単価をかけて得られる便益と各年の無収水対策コストを、割引率10%を用いて現在価値に直し、費用便益比（B/C）を求めた結果を表-9に示す。水道料金が10円/ m^3 という安い水準であっても無収水対策の便益は大きく、予算制約が厳しくてもむしろ費用便益比は良いことが分かった。これは、漏水修理、メーター更新、違法接続対策など、費用対効果の高い対策から優先的に実施することが最適解となるためであると考えられる。水道料金が30円/ m^3 の場合は費用便益比が大きくなり、水道料金水準が高い水道事業体ほど、無収水対策への取り組みを強化すべきであることが示唆された。

図-3 無収水量とその内訳の変化

表-9 費用便益比（B/C）

	水道料金が 30円/ m^3 の場合	水道料金が 10円/ m^3 の場合
予算投入率10%	5.24	2.44
予算投入率5%	7.62	3.70
予算投入率1%	34.18	16.64

(2) 施設条件の影響

水道施設の条件が変化した場合に、無収水対策の選択に変化があるかどうか検討する。

違法接続率の初期値は、1%、5%（基本シナリオ）、10%の3つのシナリオで計算した。5年分の対策の合計投資額の対策別内訳構成比を図-4に示す。予算投入率が10%の場合と5%の場合、違法接続率の初期値が大きくなるにつれて、違法接続対策への投資も比例して大きくなり、その分送配水管更新や給水管更新の投資が減少することが明らかとなった。一方、予算投入率が1%の場合は違法接続の数に対して対策予算が追いつかず、初期違法接続率が5%の時と10%の時で構成比に変化はなかった。違法接続対策は図-2で示したとおり優先度が高いため、違法接続の初期値が大きければそれに応じた対策予算が配分されると考えられるが、予算が少ない場合にはそのような対応が困難になることが明らかとなった。

メーター設置率の初期値の変化も、同様の傾向を示した。図-5はメーター設置率の初期値を、100%、75%（基本シナリオ）、50%と変化させた場合の5年分の対策の合計投資額の対策別内訳構成比であり、予算投入率が大きい場合はメーター設置率の初期値が低いほど新規

メーターの設置を積極的に進めることが最適であるが、予算制約が厳しい場合には新規メーターの設置が困難となる結果であった。

一方、送配水管からの漏水に影響すると考えられる送配水管総延長と送配水管の管種は、送配水管の漏水探知・修理の対策数量には影響するものの、送配水管更新の対策数量には影響しないことが明らかになった。送配水管漏水修理は対策数量が漏水箇所数を上限とすることになり小さいことから、予算に占める対策費用の割合が小さいため、対策費用でみると施設条件の変化の影響が表れにくい。そのため、5年間の対策数量合計が施設条件の変化によってどのように変化するか変化率を計算すると、送配水管漏水修理箇所数のみ、送配水管総延長が3,000kmの場合を1として、5,000kmの場合は1.7、7,000kmの場合は2.3と増加したが、他の対策は変化がなく、送配水管総延長の変化は、送配水管漏水修理箇所数にのみ影響することが明らかとなった。これは、送配水管総延長が長くなることにより、漏水箇所数が増えるため、優先的に対応することが最適解となるためであると考えられる。また、送配水管の管種をCIPとした場合、漏水箇所数が大幅に減少するため、送配水管漏水修理数も大幅に減少した。いずれの施設条件の変化に対しても、見掛け損失に対する対策と漏水修理が優先され、予算に余裕がある場合のみ送配水管の更新に予算が配分される結果となったため、送配水管更新対策の最適解（更新延長）はほとんど変わらなかった。

また、平均水圧が変化した場合の対策数量は、変化がなかった。平均水圧が大きくなれば漏水量が増え、実損失への対策の優先度が上がると考えられるが、その他の見掛け損失対策を上回るまでの優先度にはならず、最適な対策選択は変わらなかったものと考えられる。

図-4 違法接続率初期値の変化に伴う対策構成比の変化

図-5 メーター設置率初期値の変化に伴う対策構成比の変化

(3) 無収水削減量原単位に関する感度分析

本研究のモデルでは、無収水の原因ごとに仮定を置いて無収水量の原単位を設定し、無収水量を計算している。原単位が変化した場合に最適な対策の組み合わせにどのような影響が出るか確認するため、目的関数に含まれる原単位を対策毎に±50%変化させ、5年間の対策実施数に関する感度分析を行った結果を表-10に示す。

メーター更新、違法接続対策、漏水修理のように、どの予算投入率の下でも優先度の高い対策は、原単位が変化しても対策実施数量が大きくは変化せず、実施可能な数量のほぼ上限まで対策を行うことが最適であることが明らかとなった。本モデルで設定した原単位は水道事業体によって変化することが考えられるが、その場合であってもこれらの対策は優先的に実施するべきであるという点に変わりはないと言える。一方、送配水管更新、給水管更新のように優先度が劣化する対策は、原単位が小

表-10 無収水削減量原単位に関する変化率

対策			50%減	基本	50%増
X _{1j} (メーター更新)			変化させる原単位: UMN (m ³ /年)		
			150	300	450
	予算投入率	10%	-3.1%	—	8.0%
		5%	-2.8%	—	2.4%
		1%	-14.1%	—	1.5%
X _{2j} (メーター設置)			変化させる原単位: UNM (m ³ /年)		
			150	300	450
	予算投入率	10%	0.0%	—	0.0%
		5%	0.0%	—	0.0%
		1%	0.0%	—	0.0%
X _{3j} (違法接続対策)			変化させる原単位: UIC (m ³ /年)		
			300	600	900
	予算投入率	10%	0.0%	—	0.0%
		5%	0.0%	—	0.0%
		1%	-4.2%	—	0.0%
X _{4j} (送配水管更新)			変化させる原単位: ULURBD (m ³ /時間/水圧 (m))		
			0.12	0.24	0.36
			変化させる原単位: ULUGD (m ³ /時間/水圧 (m))		
			0.06	0.12	0.18
	予算投入率	10%	-57.8%	—	0.0%
		5%	0.0%	—	0.0%
		1%	0.0%	—	0.0%
X _{5j} (送配水管漏水修理)			変化させる原単位: ULUGD (m ³ /時間/水圧 (m))		
			0.06	0.12	0.18
	予算投入率	10%	0.0%	—	0.3%
		5%	0.0%	—	0.0%
		1%	0.0%	—	0.0%
X _{6j} (給水管更新)			変化させる原単位: ULRBS (m ³ /時間/水圧 (m))		
			0.016	0.032	0.048
			変化させる原単位: ULUGS (m ³ /時間/水圧 (m))		
			0.016	0.032	0.048
	予算投入率	10%	-60.1%	—	0.1%
		5%	-31.4%	—	1.4%
		1%	0.0%	—	0.0%
X _{7j} (給水管漏水修理)			変化させる原単位: ULUGS (m ³ /時間/水圧 (m))		
			0.016	0.032	0.048
	予算投入率	10%	-0.1%	—	4.9%
		5%	-2.9%	—	4.0%
		1%	0.0%	—	0.0%

さくになると最適な対策数量は大幅に減少することがあることが明らかになった。例えば、給水管更新に対する無収水量原単位を-50%とした場合、給水管更新の実施数量は60.1%減少し（予算投入率が10%の場合）、その分

の予算を充当する形で配水管更新の実施数量が増えた。これらの対策については、各水道事業体の原単位を可能な限り把握して対策の選択を検討することが望ましいと言える。

(4) 開発途上国のフィールドでの適用に向けて

本研究で構築した無収水対策選択モデルは、入力パラメーターや目的関数などを様々に変化させて計算を行うことが可能である。途上国のフィールドにおける適用可能性については、以下のように考えられる。

- 原単位やパラメーターにフィールドの実測データ等を用いることによって、実効性のある無収水対策計画を策定することができる。
- 本研究では5年後の無収水量を最小化するという最適化を行ったが、追加的な水資源開発が困難な水道事業体では見掛け損失よりも漏水などの実損失の削減を優先すると考えられ、また費用便益比の最大化を目指した場合や、各年の無収水量の合計値の最小化を目指した場合など目的関数を変えた場合や、単位費用当たりの無収水の削減量が大きい対策から順次実施するなど最適化の方法を変えた場合には、最適な対策の選択も変化すると考えられる。より長期間での無収水量の最小化を目指した場合には、送配水管更新等の長期的に便益の大きい対策の優先度が上がる可能性もある。水道事業体の方針に合わせて目的関数を設定した検討が可能である。
- 途上国の水道事業体においては、入手可能なデータが限られているが、施設条件に対する最適な無収水対策の選択について分析を深めることにより、比較的入手しやすいデータから最適な無収水対策の選択を示すことができれば、意思決定支援のためのツールとして有用であろう。

5. 結論

無収水対策選択モデルを用いて、最適対策を分析した結果、以下のような知見と示唆が得られた。

- 構築したモデルにより、無収水対策の最適な選択について分析できることが明らかになった。無収水対策の計画立案において適用可能である。対策の効果、費用便益比なども示すことができるため、途上国に対して無収水対策の必要性を啓発する際にも有用であると考えられる。
- 無収水対策の選択には、予算制約が大きく影響することが明らかになった。対策に充てられる予算が少ない場合には、漏水修理やメーター更新、違法接続対策を優先することが望ましい。予算が多い場合に

は、給水管更新、送配水管更新などの施設投資が実施できるようになる。これは、前者のような対策は自己資金で対応可能であるため、技術協力等によって能力強化を行いつつ途上国側の自助努力による実施を促し、後者のような対策は補助金や援助によって支援する必要があることを示唆している。

- c. 施設条件の違いは、違法接続率の初期値、メーター設置率の初期値などは対策の組み合わせに大きく影響したが、平均水圧は影響しなかった。
- d. メーター更新、違法接続対策、漏水修理などの対策は予算制約に拘わらず優先度が高く、無収水量原単位を変化させても、最適な対策実施数量は大きくは変化しなかった。
- e. 無収水対策の費用便益比は大きいことが明らかとなった。水道料金が低い水準であっても、積極的に進めるべきである。

参考文献

- 1) WHO, UNICEF : Progress on Sanitation and Drinking Water - 2015 update and MDG assessment, pp.6-8, 2015.
- 2) Farley, M. and Trow, S : Losses in Water Distribution Networks - A Practitioner's Guide to Assessment, Monitoring and Control, IWA Publishing, pp.10-11, 2003.
- 3) 水道技術研究センター：日本の水道事業体の「無収水率」について－平成 24 年度水道統計に基づく試算結果（その 1）, JWRC 水道ホットニュース No.445, 2015.
- 4) Kingdom, B., Liemberger R. and Marin P.: The Challenge of Reducing Non-Revenue Water (NRW) in Developing Countries - How the Private Sector Can Help: A Look at Performance-Based Service Contracting, The World Bank, pp.2, 2006.
- 5) Asian Development Bank: The issues and challenges of reducing non-revenue water, pp.4-6, 2010.
- 6) Wyatt, A. S.: Non-Revenue Water: Financial Model for Optimal Management in Developing Countries, RTI Press Publication, 2010.
- 7) Farley, M. et al: The Manager's Non-Revenue Water Handbook - A Guide to Understanding Water Losses, Ranhill Utilities Berhad and the United States Agency for International Development (USAID), pp.44-46, 2008.
- 8) 水道技術研究センター：持続可能な水道サービスのための管路技術に関する研究（e-Pipe プロジェクト）報告書, pp.2-77, 2011.
- 9) Mutikanga, H., Sharma, S. and Vairavamoorthy, K.: Water loss management in developing countries: Challenges and Prospects, Journal AWWA, Vol.101, No.12, 2009.
- 10) 国際協力機構：ブラジル国 無収水管理プロジェクト 事前調査報告書, pp.66, 2008.
- 11) 水道技術研究センター：上水道事業の口径別配水管延長について－水道統計に基づく試算結果（その 2）, JWRC 水道ホットニュース No.449, 2015.
- 12) Seago, C., Bhagwan, J. and McKenzie R.: Benchmarking leakage from water reticulation systems in South Africa, Water SA, Vol. 30, No.5, 2004.
- 13) 国際協力機構：ソロモン諸島国水道公社無収水対策プロジェクト詳細計画策定調査報告書, pp.4-16, 2012.
- 14) 国際協力機構：ミャンマー国マンダレー市上水道整備計画準備調査最終報告書, PP.3-32, 2015.
- 15) McIntosh, A. C.: Asian Water Supplies - Reaching the Urban Poor, Asian Development Bank and International Water Association, pp.25, 2003.
- 16) 国際協力機構：エルサルバドル国上下水道公社事業運営能力強化プロジェクト プロジェクト事業完了報告書, pp.38, 2011.
- 17) 国際協力機構：バングラデシュ国 チッタゴン上下水道公社無収水削減推進プロジェクト プロジェクト事業完了報告書, pp.2-6 - 2-8, 2013.
- 18) 国際協力機構：パラグアイ国配水網管理技術強化プロジェクト プロジェクト業務完了報告書, pp.2-40, 2014.
- 19) 宮代隆平：整数計画ソルバー入門, オペレーションズ・リサーチ, Vol.57, No.4, 2012.

(2016. 3. 22 受付)

DEVELOPMENT OF A MODEL FOR THE SELECTION OF NON-REVENUE WATER REDUCTION MEASURES IN DEVELOPING COUNTRIES USING INTEGER PROGRAMMING

Shigeyuki MATSUMOTO and Hidetoshi KITAWAKI

Many water utilities in developing countries are suffering from large amount of non-revenue water (NRW), which worsens their financial situations and hampers investment for expansion and improvement of their water supply service. This research developed a model using integer programming to find an optimal combination of NRW reduction measures in developing countries, which takes into account composition of NRW, budget limitation, and cost, benefit and change in effect of each measure. The model has made it possible to show optimal NRW reduction measures and analyze influence of parameters, budget limitation, and other conditions.