

3. 都市における水循環システムの最適化マニュアルに関する調査

下水道研究室 室長 森田 弘昭
主任研究官 松原 誠
建設システム課 課長 溝口 宏樹
主任研究官 高村 和典

1. はじめに

下水道の普及拡大に伴って、下水道を経由する排水量（下水処理水及び雨水）の割合が、都市内の水循環の多くを占めるようになってきた。しかし、都市内における水環境は必ずしも良好とはいえない場合もあり、また生活様式の変化により求められる水量、水質のレベルも大きく変化している。良好な水環境を達成するためには、都市域における水循環システムを定量的に把握し、関連する施策－例えば、高度処理の実施、合流式下水道改善対策、処理水の有効利用、ノンポイント汚濁対策、雨水貯留・浸透など－について水循環の観点から把握・評価する必要がある。

そこで本調査では、都市域における各種施策を定量的に評価できる水循環モデルを構築し、良好な水環境達成のための効率的な事業手法についてコスト面も含めて検討するとともに、モデル構築の手法を一般化し、望ましい水環境像についての合意形成を図るための支援ツールとして活用しようとするものである。

2. 研究方法

2. 1 水循環モデルの構築

ほぼ全域が下水道整備済みである都市河川流域を対象として、水量水質をともに計算できる水循環モデルを構築した。モデルは、土地利用や局所的な施策を反映でき、パラメータ設定も比較的容易な分布型の土地利用別タンクモデル（複合タンクモデル）とした。モデル定数同定用に水量水質の現地調査も行った。

2. 2 建設コスト分析

道路埋設基準改訂に伴う管路建設コストの削減効果を明らかにするために、基準緩和以前と緩和後の2条件下においてモデル処理区2ケースにおける全体工事費を試算し、本基準緩和による処理区単位での管路建設コストの削減効果を解析評価した。

3 水循環モデルの構築に関する研究結果

3. 1 対象流域の概要

水循環モデルの対象流域に川崎市内を流れる平瀬川（1級河川多摩川水系）の流域を選定した。モデリングは中之橋上流流域 11.13km²を対象とした。この流域は都市化が進展し、流域内人口密度は約 85 人/ha、下水道普及率は約 98%である。下水道は分流式で整備されており、汚水は流域外にある処理場に流集され、雨水は自然流下により平瀬川に放流されている。

モデル定数同定のための現地調査地点として嶋田橋（流域面積 5.01km²）、中之橋の2地点を選定し、水量水質を実測した。また既存の水文データとして中村橋（流域面積 1.81km²）の水位データ、および近傍9地点の雨量データ（いずれも川崎市提供）を使用した。図1に調査対象流域の概要図を示す。



図1 平瀬川流域と水量調査地点位置

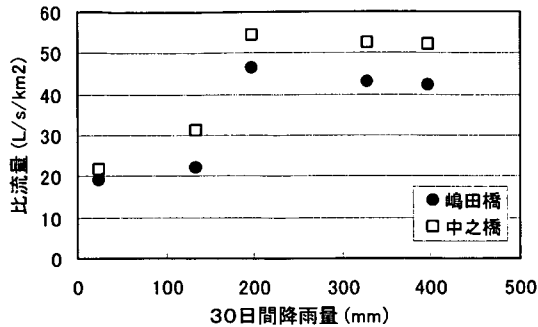


図2 前期降雨と比流量の関係

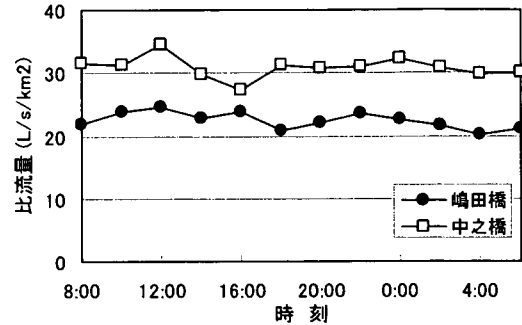


図3 詳細調査における流量観測結果

3. 2 現地調査結果

3. 2. 1 調査方法

前述の2地点において、1日に水量を3回、水質を1回測定する概略調査を7回(調査期間:9月~1月)、2時間ピッチで水量、水質を12回測定する詳細調査を1回(11月)、いずれも晴天時に実施した。水量は可搬式電磁流速計を用いた流速計測により測定した。水質はBOD, COD, SS, T-N, T-Pについて分析した。

3. 2. 2 調査結果(水量)

河川流量は降雨の比較的多い11月前半までと、降雨量が減少した11月後半以降で大きく変化していた。各地点の比流量を計算し、これを調査日の29日前からの降雨量の積算値(30日間降雨量、菅生の降雨データを使用)との関係で示すと図2のようになった。また詳細調査の結果は図3の通りであった。

3. 2. 3 調査結果(水質)

概略調査結果(午前10時~11時に採水)と詳細調査結果のうち午前10時のデータを、採水と同時刻の比流量との関係で示したものが図4である。また詳細調査結果を示したものが図5である。図4より、BOD, CODは比流量が大きいほど濃度が小さく、また図5より明確な時間変動パターンが確認されることから、これらの流入負荷は雑排水等によるものが中心と考えられる。またT-Pについても、これらとほぼ同様な傾向であった。これに対し、T-Nは比流量によらず水質が一定で、かつ日間変動も小さいことから基底流出によるものが中心と考えられる。

3. 3 水循環モデルの概要

3. 3. 1 解析対象とする水循環要素

構築する水循環モデルは、都市域を対象として水量水質を計算することから、通常の河川流域を対象とする水循環要素(降雨、流出、浸透、蒸発散など)に加え、以下にあげる要素を取り込むこととした。

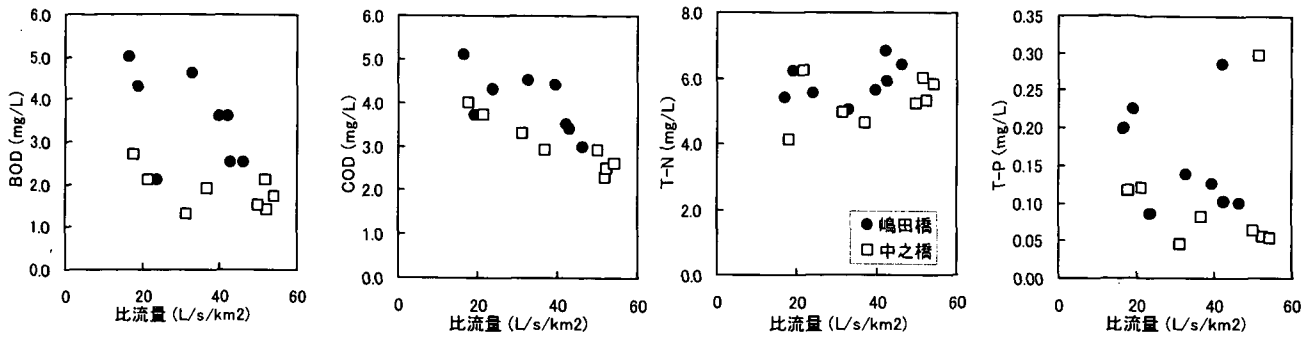


図4 水質と比流量の関係 (午前10時のデータによる比較)

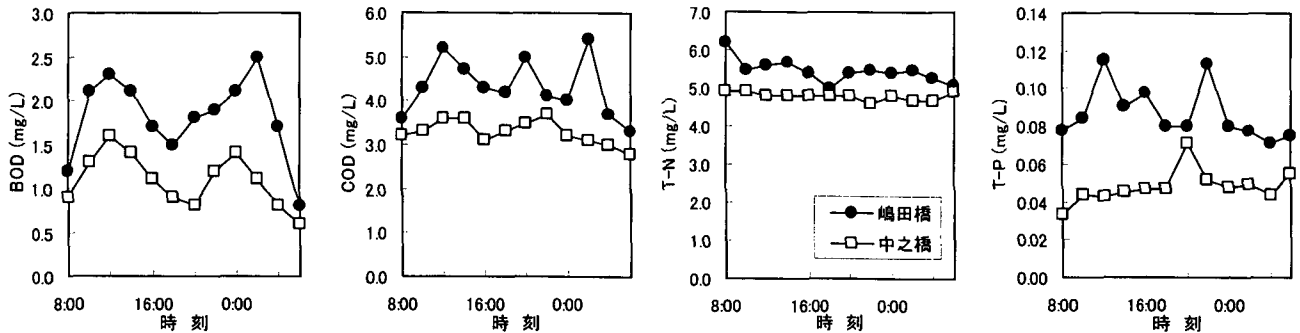


図5 詳細調査における水質分析結果

- 上水道：流域内への配水に加え、漏水についても考慮する。
- 下水道：晴天時における地下水浸入に加え、雨天時浸入水も考慮する。
- 下水道以外の汚水処理施設：個別処理の場合処理水が流域内に流入する。雑排水の流入も考慮。また必要に応じ各種施策（浸透・貯留など）について適宜モデル内に取り込む。

3.3.2 モデルの構成と解析の流れ

対象流域を 250m のメッシュで分割し、これらを落水線の方向に連結した分布型モデルとした。降雨量と気温、日照時間をモデルへの入力とし、各地点における水量、水質 (BOD, COD, T-N, T-P) が出力として計算される。計算時間間隔は1時間とした。

図6に流域をメッシュ分割した状況を示す。メッシュ数は219である。各メッシュの標高データから落水線を作成し、これを実際の雨水排水区と比較したものが図7である。落水線は排水区の分割状況をよく反映していることがわかる。

図8にモデルの構成と解析の流れに

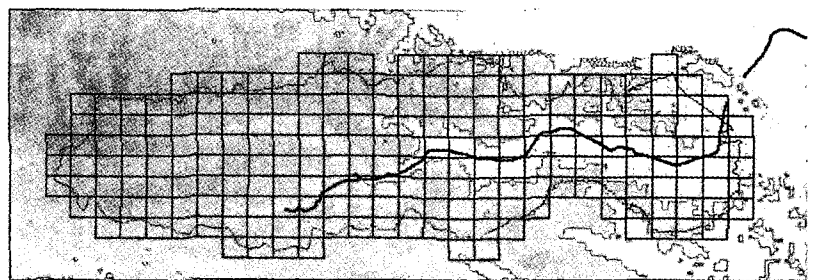


図6 流域のメッシュ分割状況

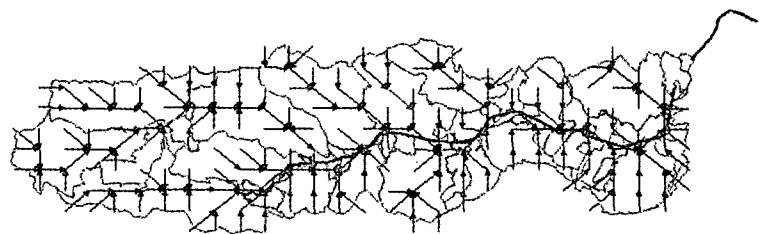


図7 落水線と雨水排水区の関係

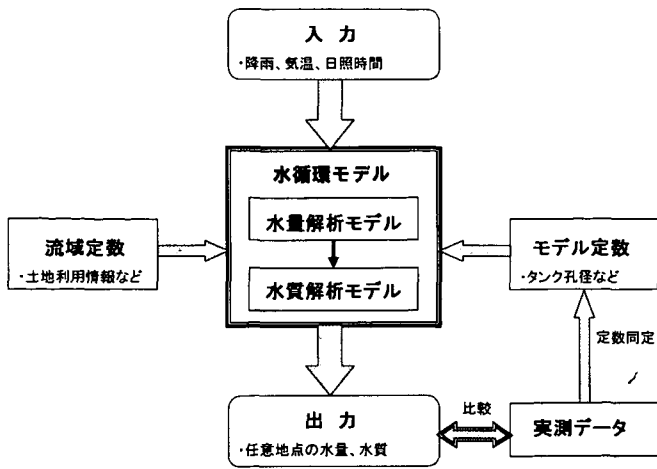


図8 モデルの構成と解析の流れ

表1 流域定数とその情報源

分類	項目	情報源
地形	流域内メッシュ面積	雨水排水区界
	落水線の方向	50mメッシュ標高データ
	流路延長	流域内メッシュ面積
	流路勾配	河川勾配
土地利用	土地利用別タンク面積	細密数値情報、流出係数
人工系水循環	上水道漏水量	配水量、漏水率
	下水道排水量	配水量、漏水量、
	単独浄化槽排水量	水量原単位、浄化槽設置基数、
	合併浄化槽排水量	下水道接続率、メッシュ別人口
	雑排水量	工業・商業用地面積率など
	事業場排水量	

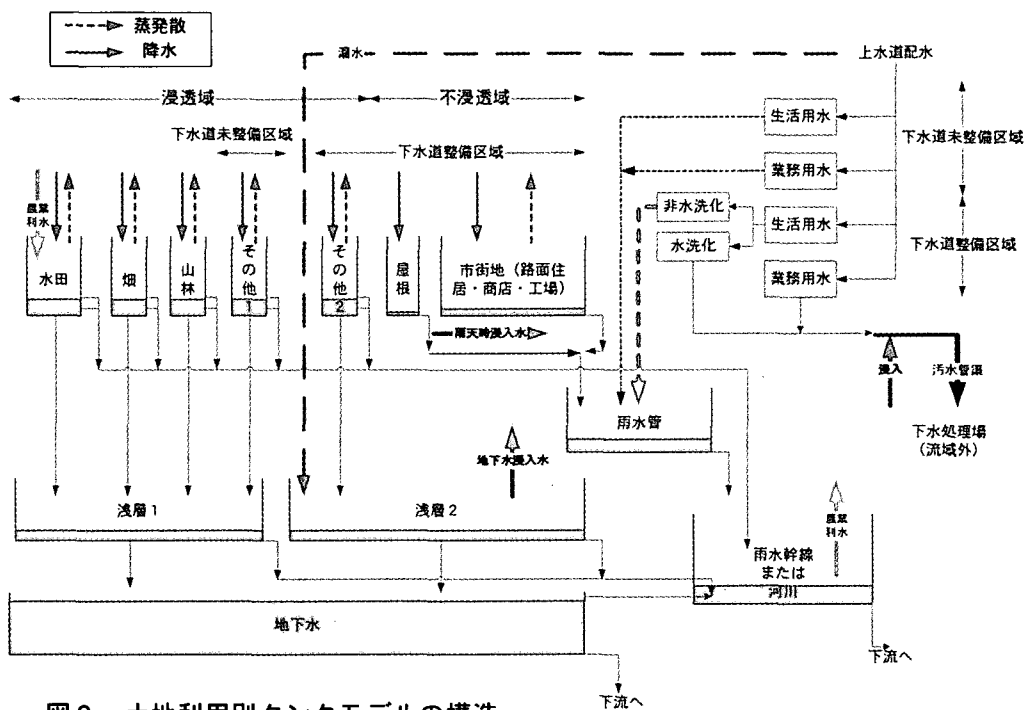


図9 土地利用別タンクモデルの構造

ついて示す。水循環モデルは水量解析モデルと水質解析モデルによって構成される。モデル内ではまず水量解析モデルにより水量計算を行い、得られた水量をもとに水質解析モデルにより負荷流出量を計算する。また流域定数とは各メッシュに与えられる基礎情報のことであり、既存の分布情報から決定する。またモデル定数とはモデル内の計算式中の定数や原単位であり、各メッシュとも一律の値をとる。モデル定数の一部は実測データを用いた同定検証により最適値を決定する。表1に流域定数とその情報源について示した。

3.4 水量解析モデル

3.4.1 水量解析モデルの構造

分割された各メッシュでは、3層からなる土地利用別タンクモデルにより流出量を計算する(図9)。各メッシュは河川タンクおよび地下水タンクによって連結され、落水線の方向にのみ流れるものとする。

表層の土地利用は、浸透域である水田、畑、山林、その他1、その他2、不浸透域である屋根、市街地(路

面)の7通りに分類した。各土地利用ごとの面積(タンク面積)は細密数値情報(10mメッシュ)を利用して求めた。浸透域、不浸透域が混在する土地利用については、下水道計画における流出係数から不浸透面積率を換算し、それぞれに分類した。メッシュ内の土地利用は図10のように集中化して扱い、これが表層タンクの形状(流路幅)を規定するものとした。

不浸透域の雨水は雨水管を経由して河川に流入し、一部は雨天時浸入水として污水管へと流入する。浸透域の雨水は雨水管を経由することなく、表面・中間流出により直接河川に流入する。下水道整備区域の浸透域(その他2)では、一部が浅層タンク経由で污水管へと流入する。また污水については、流域定数として各メッシュに処理方式別の排水量を与え、浄化槽排水や雑排水などは雨水管を経由して河川に流入させる。

なお、河川および雨水管については面積を持たないタンクとしてモデル化し流出計算を行うが、污水管については処理場が流域外にあることからタンクを設定していない。

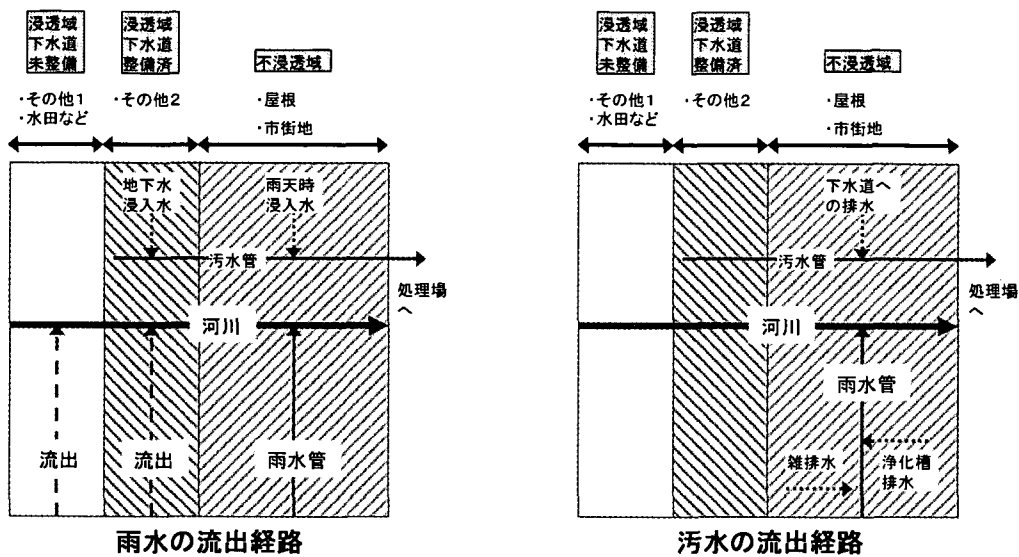


図10 メッシュにおける雨水、污水の流出経路

3.4.2 各タンクの水量計算方法

各タンクは図11のように一般化される。よって連続式は次のように表される。

$$\frac{dZ}{dt} = R - E + Q_p + Q_u - \sum_{i=1}^4 Q_i + Q_{in} - Q_{out}$$

各タンクが必要とする項について整理すると表2のようになる。各項の計算方法は以下の通り。

- 1) 降雨量 R : ティーセン分割によって得られた各メッシュに対応する降雨量データを入力する。降雨損失についてはタンク係数によって調節する。
- 2) 蒸発散量 E : Hamon 式を用いて計算する。
- 3) 上層メッシュからの流入量 Q_p 、上流メッシュからの流入量 Q_u : 各時間における計算を上層から下層へ、上流から下流へと計算するため既知の情報である。
- 4) タンクからの流出量 $Q_1 \sim Q_4$: 表2に示すとおりタンクの種類によって計算方法を変える。(後述)
- 5) その他の流入 Q_{in} 、その他の流出 Q_{out} : 雑排水、上水道漏水、地下水浸入水等が相当する。

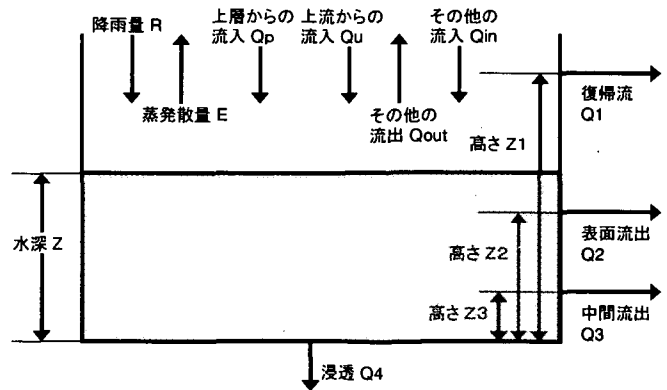


図11 各タンクの一般的構造と水収支

各タンクからの流出量であるが、通常のタンクの場合、タンクの水深に応じて次式により計算する。

$$Q_i = A_i(Z - Z_i)$$

ここで、 A_i はタンク孔径、 Z_i はタンク孔高さである。

水田等の表層浸透域タンクについては、表面流出について Manning 則、中間流出については Darcy 則が成り立つものとして、次式により計算する。

$$Q_2 = B(Z - Z_2) \frac{1}{N_1} R^{2/3} I^{1/2}$$

$$Q_3 = B(Z - Z_3) K_x I$$

ここで、 B は流路幅、 N_1 は等価粗度係数、 R は径深、 I は勾配（流路勾配と同一とおく）、 K_x は水平方向透水性係数である。また、面積を持たないタンクである雨水管と河川の流出計算は、水深 Z の場合に水面幅が $2Z$ となるような疑似三角水路を想定し、Manning 則により次のように計算する。

$$Q_2 = Z^2 \frac{1}{N_2} R^{2/3} I^{1/2}$$

雨天時浸入水量は屋根タンクからの流出水量に浸入水率 β_1 をかけて、地下水浸入水量は浅層 2 タンクの水深 Z に浸入水率 β_2 をかけて求めることとした。また雑排水等の流入については流量の時間変動を考慮して、各メッシュに流域定数として与えられた排水量に時間変動係数 T をかけてから流入させた。

3. 5 水質解析モデル

3. 5. 1 水質解析モデルの構造

水質解析モデルでは、水量解析モデルにより計算される流出量を用いて、各メッシュから流出する負荷量を計算する。汚濁源として面源負荷（表層タンク）、基底流出に伴う負荷流出（浅層、地下水タンク）、雑排水等の流入（雨水管タンクへの流入）の 3 種類を想定した（図 1 2）。

各汚濁負荷は浮遊性（固形物）と溶解性に分けて計算することとした。ただし、浮遊性と溶解性との間でのやりとりは考慮せず、また現地調査においてこれらを区別して測定していないため、最終的な計算結果（およびモデル定数同定）はこれらの和によって表現している。また、各層のタンクは負荷量に関しては縁切れとし、それぞれに原単位を与えて計算することとした。

3. 5. 2 各タンクの水質計算方法

連続式を考慮せず原単位のみを与えて計算するタンク（水田等浸透域、浅層・地下水）については次式によって流出負荷量を計算する。

$$L_{out} = C \cdot Q$$

L_{out} はタンクからの負荷流出量、 C は原単位（水質）、 Q は流出量である。なお、水田等浸透域において表面流出は浮遊性、中間流出は溶解性と仮定している。

その他のタンクについては、負荷の連続式を考慮し、浮遊性、溶解性に分けて次式により計算する。

$$\frac{dS}{dt} = L_{in} - L_{out}$$

表 2 各タンクにおいて考慮すべき項

(注：網掛け部は計算方法が異なるタンク)

	水田等浸透域	屋根	市街地	浅層1	浅層2	地下水	雨水管	河川
R	○	○	○					
E	○		○					
Qp				○	○	○	○	○
Qu						○		○
Q1						○		
Q2	○	○	○				○	○
Q3	○			○	○	○		
Q4	○			○	○			
Qin					○		○	
Qout					○			

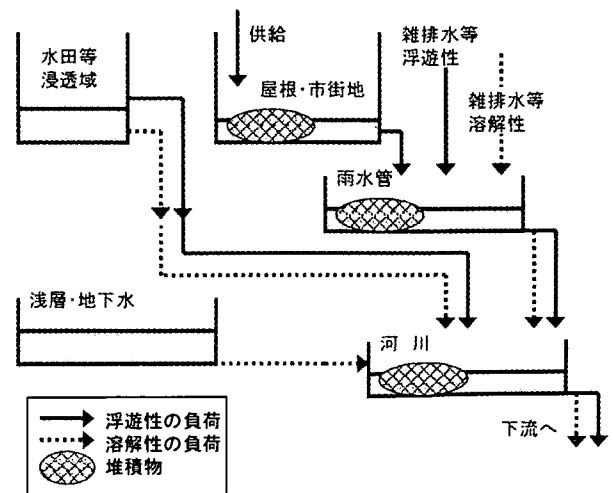


図 1 2 水質解析モデルの構造

ここで、 S はタンク内に残存する負荷量、 L_{in} はタンクへの供給負荷量である。

表層の屋根・市街地においては負荷を浮遊性のみと仮定し、流出負荷を次の運動式により計算する。

$$L_{out} = K_1 \cdot S \cdot Q$$

ここで、 K_1 は負荷流出係数である。またタンクへの供給量は土地利用別に供給速度をモデル定数として与える。

雨水管タンクにおいては、浮遊性の運動式は屋根等と同じ式を用い、溶解性の運動式は次式を用いる。

$$L_{out} = (S/V) \cdot Q$$

ここで、 V はタンク内の残存水量である。またタンクに供給される雑排水等の負荷量を浮遊性と溶解性に区別するため、各水質項目の溶解性割合についてモデル定数として与える。

河川タンクにおいては、溶解性の運動式は雨水管と同じ式を用い、浮遊性の運動式は次式を用いる。

$$L_{out} = K_2 \cdot S \cdot Q^2$$

3. 6 モデル定数の同定と計算結果

水循環モデルにおいて使用するモデル定数の一覧を表3に示す。これらの定数のうち、特に晴天時の水量・水質に影響が大きいもの、もしくは既存の情報により決定しがたいものについて同定の対象とした。同定はまず水量に関するモデル定数を確定したのちに、水質に関するモデル定数について行った。

表3 モデル定数とその決定方法

分類	項目	適用	記号	同定	情報源		
水量	タンクパラメータ (表層)	孔高さ	タンク別	Z_i	・既往関連調査文献 ・修正RRL法における降雨損失		
		孔径	タンク別	A_i			
	タンクパラメータ (浅層・地下水)	孔高さ	タンク別	Z_i	○		
		孔径	タンク別	A_i			
	粗度係数	表層浸透域タンク		$N1$	・既往関連調査文献 ・河川計画		
		雨水管・河川タンク		$N2$			
	水平方向透水係数			K_x	○	・表層土壌の分布状況	
	浸入水率	雨天時浸入水		$\beta 1$	○	・雨天時処理場流入下水量など	
		地下水浸入水		$\beta 2$		・晴天時処理場流入下水量など	
	時間変動係数			T		・実測流量および流域定数	
水質	水質原単位	表層浸透域タンク	タンク別、水質別	C	○	・流総指針より ・実測水質など	
		浅層・地下水タンク	水質別	C			
		単独浄化槽処理水質	水質別				・流総指針より
		合併浄化槽処理水質	水質別				・流総指針より
		事業場排水水質	水質別				・合併浄化槽処理水質と同値とする
		雑排水水質	水質別			○	・流総指針など
	負荷量供給速度	屋根・市街地タンク	水質別			・既往関連調査文献	
	溶解性割合		水質別		○		
	負荷流出係数	屋根・市街地タンク	タンク別、水質別	$K1$		・既往関連調査文献	
		雨水管・河川タンク	タンク別	$K2$		・仮定に基づく計算値	

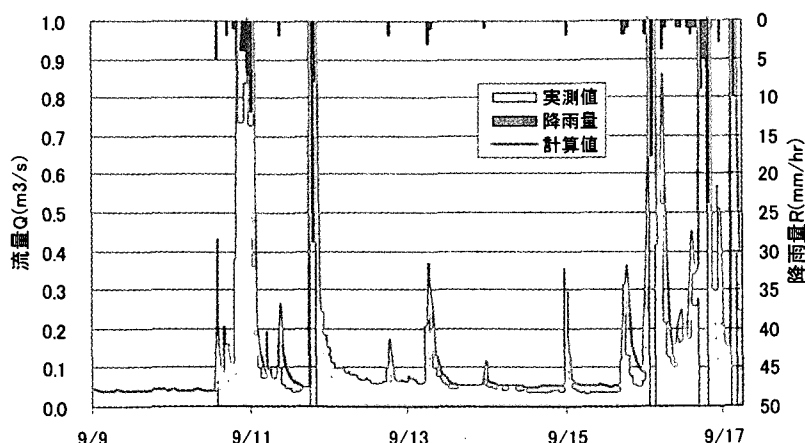


図1-3 実測値と計算値との比較 (中村橋における水量)

水量に関する同定は、中村橋における流量データに対して行った。同定後の定数による流量計算結果を図13に示す。また同定された定数を用いて嶋田橋、中之橋における流量を計算し、詳細調査結果と比較すると図14のようになる。水質に関する同定は、嶋田橋、中之橋における詳細調査データに対して行った。同定後の定数による水質計算結果を図15、16に示す。

モデル定数の同定の結果、水量、水質とも実測値と計算値がよく一致しない場合も見られた。今回構築した水循環モデルには以下に挙げるような課題が残っており、今後これらの点について検討、改良を加えていく必要がある。

- モデル定数同定の結果、実現象として想定され得ない値が最適値として同定されている。
- 同定に用いていないモデル定数の妥当性の検証が不十分
- 一般化を考えた場合にモデル化を簡略化すべき部分、逆により詳細に扱うべき部分についての検討
- 計算時間間隔とメッシュサイズの妥当性
- 現地調査データの追加（雑排水等水質、溶解性の比率等）
- モデル定数同定の手法

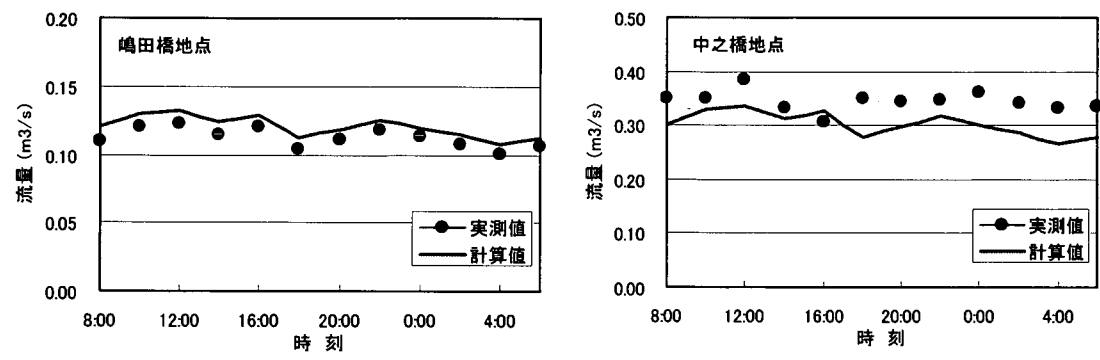


図14 実測値と計算値との比較（水量）

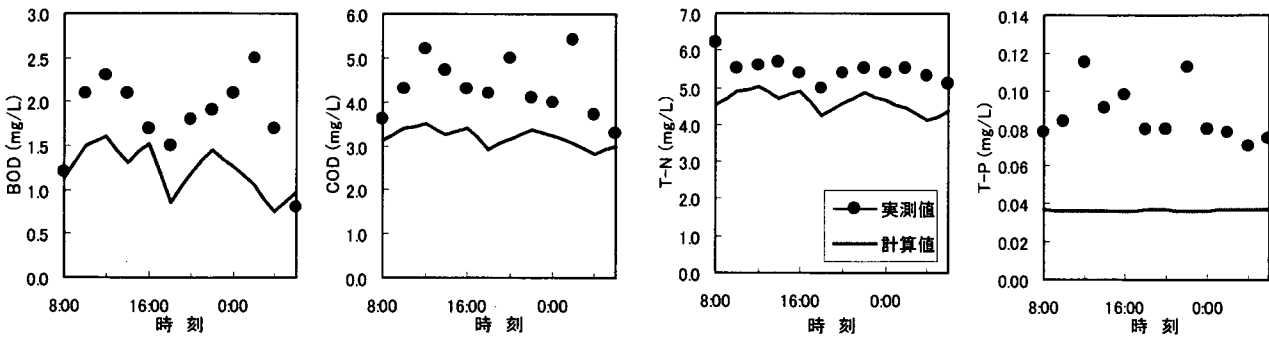


図15 実測値と計算値との比較（嶋田橋における水質）

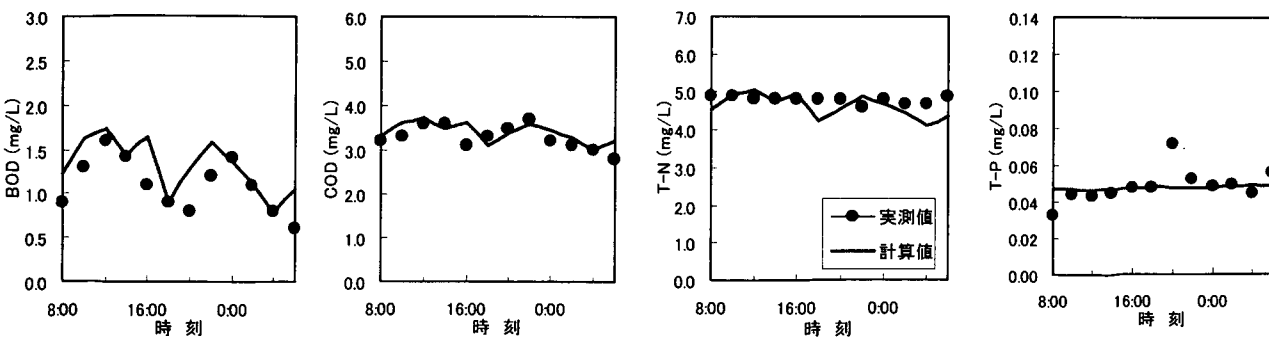


図16 実測値と計算値との比較（中之橋における水質）

4. 建設コスト分析に関する研究結果 ー道路埋設基準改訂に伴う管路建設コストの削減効果ー

道路埋設基準改訂に伴う管路建設コストの削減効果の試算にあたり、モデルとして実際に下水道計画が策定されている処理区でケース1 国道での枝線縦横断占用の影響、ケース2 国道での幹線横断占用の影響があると認められる区域を選択した。それぞれの処理区における下水道管路の国道での最小土被りを基準緩和以前を3m、緩和後を1mとし、各条件下における下水道事業計画の認可設計程度の管路網施設計画を策定して、管径、土被りごとの管路延長を算定しその変化を分析した。次に、開削、推進等の工法を想定した上土被りご

との平均的な建設費を用いて処理区全体の事業費を算定しそれぞれの全体事業費の比較、工法ごとの事業費シェアの変化を分析することにより基準緩和による管路建設コストの削減効果の評価を試みた。

まず、ケース1として国道での枝線縦横断占用の影響が認められる場合について述べる。検討対象とした処理区の概要を図17に示す。本処理区の地形的特徴は区域全体が平坦であり、下流にいくにしたがって埋設深がきわめて深くなっている。また、施設整備計画上国道沿いの集落の面整備管を国道を避けて埋設することが難しく、国道下に枝線管路を埋設せざるをえなかったケースである。対象処理区域54haのうち国道の埋設深に影響される区域面積は約11ha、本区域内に計画された面整備管は約1.4kmである。最下流点から国道までの延長が約1.8kmあり、これらの管路が国道の埋設基準に影響を受けている。

図18は基準改訂に伴う対象区域54haすべての管路に対する土被りごとの延長の変化を比率で示したものである。

土被り1.5m以下の管路が約13%増加し、3.5m以上の管路が約9%減少している。土被り3.5m以下では推進工法等の採用が一般的であり、一般的な開削工法の割合が増えることによって工法検討が容易となり事業費の軽減が期待されるとともに、発注者の負担軽減が期待される。

平均的な土被り別の施工単価を用いて算定した事業費の分布を図19に示す。推進工事を想定している土被り3.5m以上の管路の事業費が約3割以上減少し、逆に開削工法で実施される土被り1.5m以下の管路の事業費が約3割増加している。

また、処理区全体の事業費は約1割減少しており基準改訂に伴うコスト縮減効果が示されている。

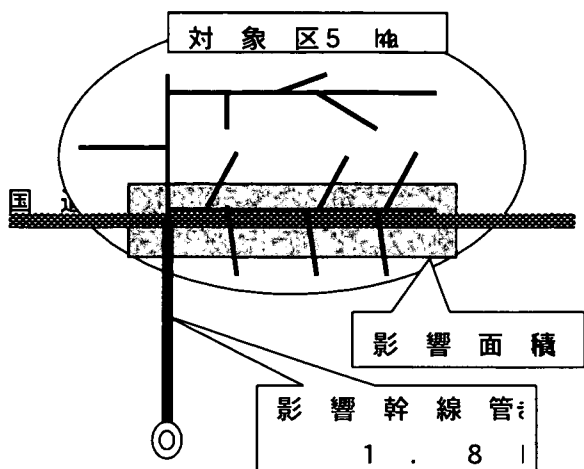


図17 検討処理区の概要 (ケース1)

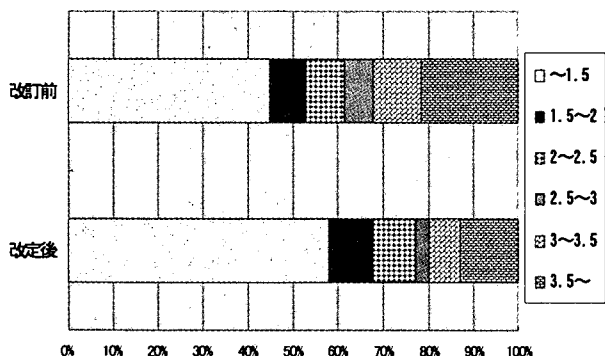


図18 基準改訂に伴う土被りの変化 (ケース1)

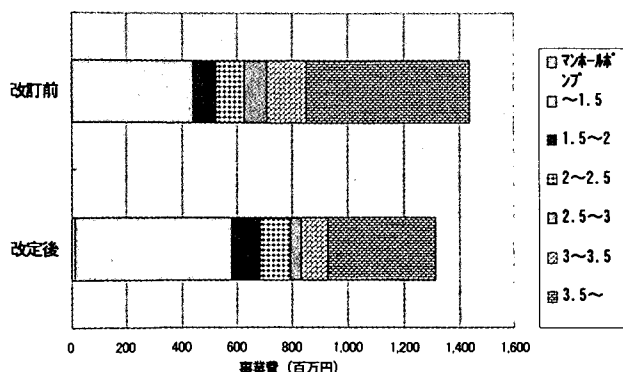


図19 基準改訂に伴う事業費の変化 (ケース1)

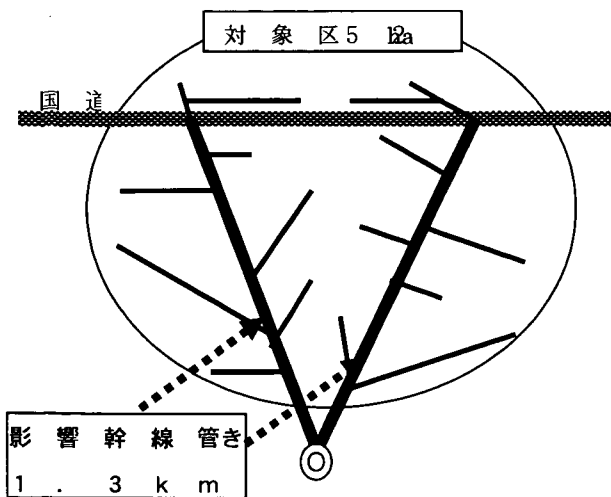


図 2 0 検討処理区の概要 (ケース 2)

次にケース 2 として国道での幹線横断占用の影響が認められる場合について述べる。

検討対象とした処理区の概要を図 2 0 に示す。本処理区の地形的特徴は幹線に沿って緩い順勾配で計画上比較的有利な条件下にある。また管路施設整備計画国道沿いの集落の面整備管を国道を避けて埋設することが可能で、幹線ルートのみ国道の埋設基準の影響が見られるケースである。約 1.3 km の幹線管路に影響が及んでいる。

図 2 1 は基準改訂に伴う対象区域 52 h a すべての管路に対する土被りごとの延長の変化を比率で示したものである。全管路延長が約 10 km あるのに対して影響を受ける管路は 1 割強でしかない。しかし、本ケースにおいても推進工事の想定される土被り 3.5m 以上の管路の割合は約 8% くらい減少しており、開削工事が可能な土被りへの移行が見られる。

平均的な土被り別の施工単価を用いて算定した事業費の分布を図 2 2 に示す。

推進工事の想定される土被り 3.5m 以上の管路の事業費は、基準改訂前と比較して約 7 割減少している。また、全体事業費に対しても 1 割強減少しており事業費の分布についても開削工事が可能な土被りへの移行が見られることがわかる。また、処理区全体の事業費は約 7% 減少しており、国道での幹線横断占用の影響のみであっても処理区全体の管路建設コストへの影響は無視できないことがわかる。

本試算により、道路埋設基準改訂に伴う管路建設コストの削減効果が処理区全体の事業費に及ぼす影響が無視できない程度存在することがわかった。従前の報告において中規模の都市をモデルとした処理区の管路構成が圧倒的に小口径開削管路のシェアが大きいこと、開削管路の事業費において管路土工、管路土留め工の占める割合が大きいことが示されている。本稿は国道の埋設基準のみを検討対象としているが、路線延長および事業費シェアにおいて

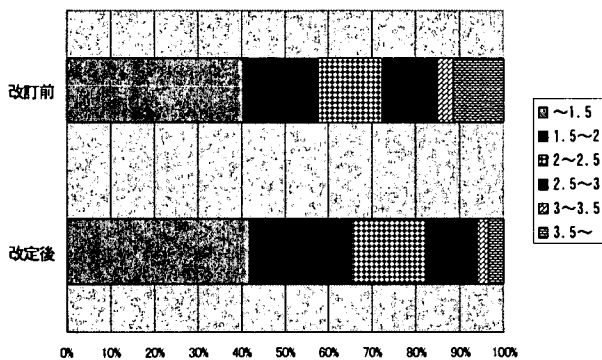


図 2 1 基準改訂に伴う土被りの変化 (ケース 2)

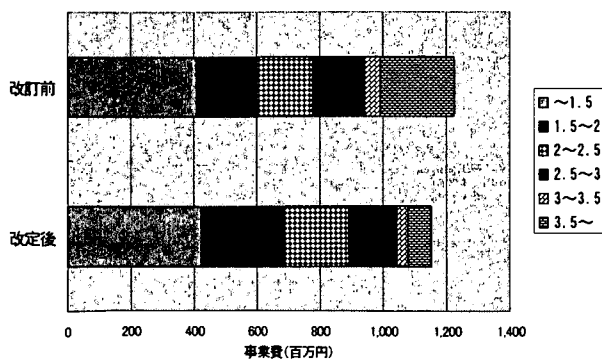


図 2 2 基準改訂に伴う事業費の変化 (ケース 2)

て浅い土被りの管路への移行がかなり見られることから、枝線管路の最小埋設基準も含めた道路埋設基準の緩和により開削管路へのシェアの移行がさらに進むものと想定され、この分野での新たな技術開発によるコスト縮減が一層望まれる所である。