

(38) GISを用いた東京都区部における人工系水循環モデルによる雑用水供給システムの導入効果の検討

Evaluation of rainwater and reclaimed wastewater reuse systems using GIS based artificial water cycle model in Tokyo

荒巻俊也^{*}、杉本留三^{**}、花木啓祐^{***}、松尾友矩^{***}

Toshiya ARAMAKI^{*}, Ryuzo SUGIMOTO^{**}, Keisuke HANAKI^{***} and Tomonori MATSUO^{***}

Abstract ; In this study, the GIS based artificial water cycle model was developed, and the influences of rainwater and reclaimed wastewater reuse systems on urban water cycle were evaluated in each area of Tokyo. The model consists of building and land use data with grid form, and digital data of sewerage system and river with vector form. From the model, many information for planning and management of these systems were obtained as the following; (1) 10% of annual water supply were replaced and 25% of annual stormwater runoff were reduced by the installation of rainwater reuse systems in 1993. (2) In the case that install the suitable system on economic aspects in each area, 17% of the total water demand in Tokyo can be replaced.

Key words ; Rainwater reuse system, Reclaimed wastewater reuse system, Urban water cycle, GIS

1. はじめに

近年、降水量の減少、また都市の水需要の増大により、都市における渇水が頻繁に起こっている。東京においても人口増加及び天候不順により、数年に1回の割合で渇水が起こり、河川上流部でのダム建設だけでは水資源の確保ができない状態にある。このような都市の水資源不足の解消、自然に対する負荷の低減のために、都市内における水の循環利用、上質な水の利用から低質な水へのカスケード利用の推進が必要である。具体的には再生水利用、雨水利用などの雑用水供給施設の導入が挙げられる。雑用水とは水洗便所用水や、散水など上質な水を必要としない用途に供給する水のことである。

雑用水供給施設は土地利用、降雨状況などの地理的状况によって効果が異なり、適切な雑用水供給施設は地域によって異なる。そのため雑用水供給施設の導入を進めるためには、都市内における地域情報と時間の概念を導入し、都市内の地域毎、及び都市全体における効果をより詳細に評価する必要がある。実際の都市における雑用水供給システムの導入効果を詳細に検討した例としては、和田ら¹⁾が寝屋川北部流域を対象として雨水貯留利用施設および再生水利用施設の導入効果を検討した例や、巖ら²⁾が福岡市域を対象に国土数値情報を用いて再生水利用施設の導入効果を評価した例などがある。しかし、実際の導入可能性を評価するにあたっては、より精度の高い地域情報を用いる方が望ましいものと考えられる。われわれの研究グループ³⁾では、東京都区部を対象として建物単位で整備されている精度の高い地理情報 (GISデータ) を基に雨水貯留施設の導入時の節水効果を評価してきた。

本研究では、このデータと下水管網や河川のGISデータを組み合わせた分布型の人工系水循環モデルを構築し、雨水利用、あるいは地区循環や広域循環による再生水利用といったさまざまな形態の雑用水供給システムの導入時の水資源転換効果や雨水流出量抑制効果を定量的に評価することを目的とする。

^{*} 東京大学先端科学技術研究センター (Research Center for Advanced Sci. & Tech., Univ. of Tokyo)

^{**} 環境庁水質保全局 (Water Quality Bureau, Environment Agency)、旧所属^{***}

^{***} 東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻 (Dept. of Urban Eng., Univ. of Tokyo)

2. モデルの概要

2.1 モデルの構成

図1はモデルの概念図である。このモデルでは、都市の建造物などの施設からの汚水と降雨からの流出水を下水道に排出し、下水処理場まで流下し、河川や海域に放流されるまでをモデル化している。モデルの基礎データとしては、主に地域を表すメッシュデータ、下水管網&河川データで構成される。また、この図に示すように、下水処理場から高度処理水を供給する広域循環システム、下水道幹線の途中に処理施設を設けて再生水を供給する上流供給式広域循環システム、地域内で循環利用する地区循環システム、建物に降った雨水を貯留利用する雨水貯留システム、の4つの形態の雑用水供給システムを評価対象とする。

図2にはモデルの平面図を示す。このモデルでは、まず各メッシュにおける雨水からの流出量と発生汚水量を算出し、各メッシュと下水管路上のマンホールと結びつけて各マンホールへの流入量を算出する。さらに、各マンホールにおける流量を上流から下流へと順次計算していく。降雨量として、実測の日降雨量データを用いて1日単位でシミュレーションを行っており、降雨にかかわる事象については季節変動を考慮している。

都区部を1辺250mの正方形の区画に区切ったものを1メッシュ（都区部全体で約13,000メッシュ）と

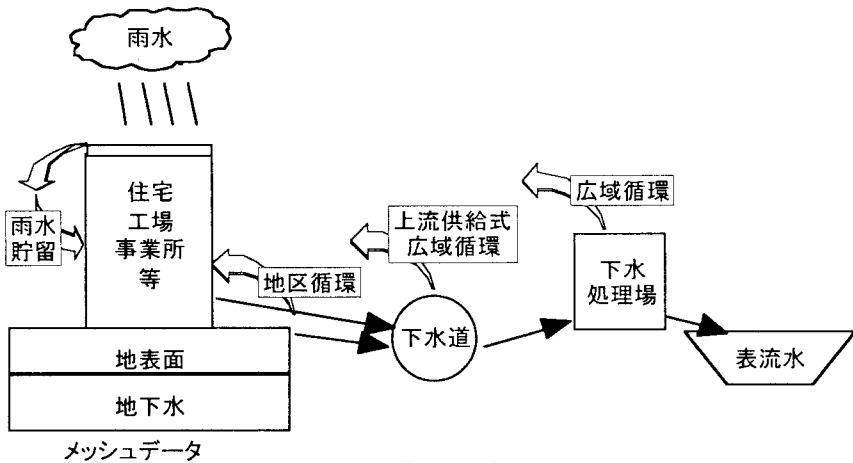


図1 モデルの概念図

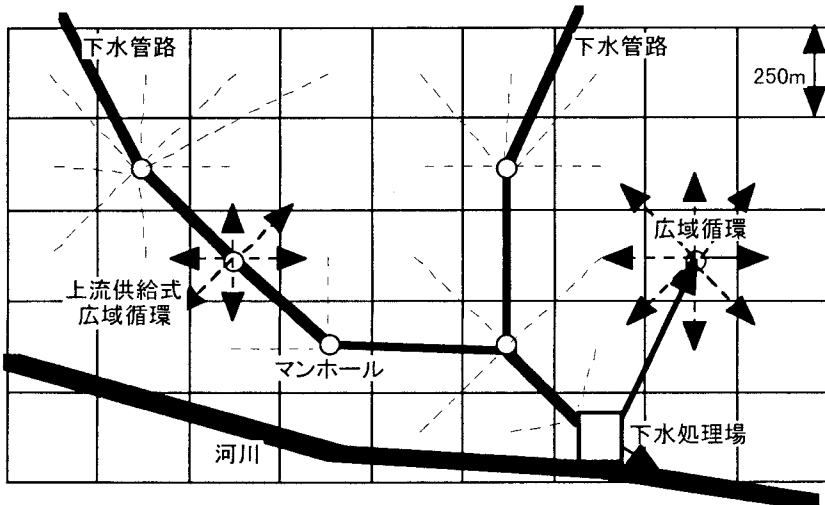


図2 モデルの平面図

しており、29種類の土地利用用途ごとに敷地、建物、延べ床面積のデータを属性として持っている。これらのデータは、東京都都市計画局が作成したGISデータ（1991年）を基に各メッシュごとの属性値を算出している。

下水管網データは、下水管渠のマンホール、下水処理場の位置情報を持つ点データの集合であり、下水管渠、下水処理場のデータ、他の管渠との接続情報を属性に持っている。これらのデータとしては、東京都下水道局が作成したデータから幹線部分を抽出して用いており、合流管、雨水管、汚水管といった属性も持っている。河川データについては、中心線を点データの集合として表現しており、デジタルマップからGISソフトウェアを用いて作成している。

2.2 発生汚水量の算出

各メッシュにおける発生汚水量は、各土地利用用途ごとの延べ床面積に原単位をかける原単位法を用いて算出する。延べ床面積当りの汚水量原単位は、水需要量＝発生汚水量と考えて、尾島ら¹⁾や空気調和・衛生工学会の報告⁵⁾⁶⁾を基に、表1に示す値をそれぞれの土地利用用途に対して採用する。表中の雑用水率については、3.で説明する。専用工場や住居併用工場からの汚水については、区ごとの統計データから直接排出分と下水道排出分とに分けて、それぞれ区ごとに延べ床面積当りの原単位を定めている。

2.3 晴天日下水量によるモデルの検証

上記のように求めた各メッシュからの発生汚水量から算出された各下水処理場への流入汚水量と、晴天日下水量の実測値を用いてモデルを検証する。表2に1990～94年度の各処理場の晴天日平均下水量⁷⁾の平均値とモデルにおける流入下水量の計算値を示す。

全処理場の合計では、計算値が実測値を若干上回っているが、モデルは概ね実際の現象を再現できているものと考えられる。一方、個々の処理場について見ると、芝浦処理場、中川処理場など実測値と計算値の間の誤差が大きな処理区もあり、今後原単位を適宜見直していく必要があるであろう。しかしここでは、都区部全体での水循環の状況を再現できたものとして、以降はこのモデルを用いて解析を行うこととする。

ちなみに、誤差の大きかった芝浦処理区では事務所建築物が多く、しかも高層のオフィスビルが多いため、本モデルで用いた一般的な事務所の原単位がこの地域には過大であったこと、個々の事業所においてすでに個別循環形式の雑用水供給施設など水の回収利用がかなり進んでいることなどが、汚水量が過大評価している要因として考えられる。中川処理区では、下水道が最近普及された地域であり、このモデルでは下水道普及率100%を仮定しているため、計算値が上回ってしまったものと考えられる。また、これら以外にも、地下水の混入などが誤差を生む要因として考えられる。

3. 雑用水供給システムのシナリオ

雑用水の利用用途としては、水洗便所用水、冷却用水、散水用水としており、土地利用用途ごとに全水需要に対するこれらの用途への利用率を雑用水率と定義して、空気調和・衛生工学会の報告⁶⁾を基に表1のように設定している。

雑用水供給システムの導入対象となる対象土地利用用途としては以下の2つのCaseを検討する。

表1 土地利用用途ごとの原単位

土地利用用途	汚水量 (L/m ² ・d)	雑用水率 (%)
官公庁施設	4.27	30
教育文化施設	9.77	50
厚生医療施設	11.46	40
事務所建築物	5.68	30
専用商業施設等	11.33	25
住商併用建物	11.33	25
宿泊遊興施設	27.24	25
スポーツ興業施設	13.10	30
専用独立住宅	10.80	15
集合住宅	9.80	20

表2 各処理場における晴天日下水量と流入汚水量の比較 (単位10m³/d)

処理場	晴天日下水量 (実測値)	流入汚水量 (計算値)	誤差
芝浦	613	897	46%
三河島	493	443	-10%
砂町	404	371	-8%
小台	294	252	-14%
落合	369	354	-4%
森が崎	1,029	1,011	-2%
小菅	176	147	-17%
葛西	242	296	23%
新河岸	518	593	14%
中川	98	189	93%
合計	4,236	4,552	7%

CaseA：主に業務系の建物を対象とし、対象土地利用用途を官公庁施設、教育文化施設、厚生医療施設、事務所建築物、専用商業施設等、住商併用建物、宿泊・遊興施設、スポーツ・興業施設とする。

CaseB：CaseAに加え、集合住宅、独立住宅を対象とする。

なお、雑用水供給システムを導入していない場合についてはCase0として評価する。

4. 雨水貯留利用システムの水資源転換効果および雨水流出抑制効果の評価

都区部全域の対象土地利用用途に対して、各メッシュ毎に貯留槽を1つ持ち、対象建物に降った雨を貯留槽に集め、処理して各建物に供給する、という形式の雨水貯留利用システムを導入するシナリオについて、水資源転換効果および雨水流出抑制効果を検討する。

4.1 シナリオの設定

集水域は対象土地利用用途の建物の屋根とし、建物面積が屋根の水平面への投影面積と一致しているものとして集水面積とする。対象建物以外の建物に降った雨については下水道へ、また建物以外の場所へ降った雨については、東京都環境保全局⁹⁾が用いている以下の関係式を用いて下水道への直接流出量を推定している。

$$(\text{直接流出率}) = 0.839 \times (\text{不浸透域の被覆率}) + 1.9$$

ここで、不浸透域の被覆率(%)は各メッシュの面積に対する建物や道路などの不浸透域の面積割合であり、直接流出率(%)は降水量のうち下水道に流れ込む水量の割合である。

雨水貯留槽容量と雨水利用量の関係をモデルを用いて予備的に解析した結果より、60mm×集水面積より貯留槽容量が大きくなると貯留槽容量の増加率に対する雨水利用量の増加率が小さくなることから、貯留槽容量は60mm×集水面積と設定する。ちなみに空気調和・衛生工学会の報告⁶⁾では50～100mmを適切な容量としている。また雑用水需要量は、対象土地利用用途における雑用水需要量の和とする。都区部全体での雑用水需要量は、CaseAで年間1.91億m³、CaseBで3.68億m³である。

集められた雨水を雑用水として最大限利用できるように運用するものと仮定して、1日をタイムステップとして貯留槽流入量、貯留量、雑用水供給量をシミュレート³⁾し、1年間の供給水量を日平均にして供給可能量としている。なお、降雨初期の雨水には汚濁物質が多く含まれており、利用にあたって注意が必要となるが、本論文では雨水を処理して利用することを考えており、また水量のバランスのみを解析の対象としていることから考慮に入れていない。日降雨データとしては東京都土木技術研究所の5地点の観測値を用い、ボロノイ分割により各メッシュの降水量を決定している。対象年度として、通常年の1993年、渇水年の1994年のデータを用いている。

4.2 水資源転換効果

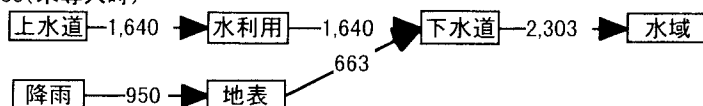
図3に1993, 94年の都区部全体での水の流れを雨水貯留施設を導入しない場合、CaseA、CaseBについて示す。上水供給量の減少率が水資源転換効果を表わすことになるが、1993年(平水年)はCaseAで3.7%、CaseBで9.9%、1994年(渇水年)はCaseAで2.7%、CaseBで7.8%となっており、最大である1993年のCaseBでは年間約1.6億m³(小河内ダムの貯水容量の約9割)の水資源が転換できることになる。雑用水需要量に対する供給可能量の比を需要供給比とすると、1993年はCaseAで31%、CaseBで44%、1994年はCaseAで24%、CaseBで35%となり、60mmという貯水槽の容量では雑用水需要の半分も賄えないこととなる。

1993年(平水年)と1994年(渇水年)で比較すると、1993年に対して1994年は降水量では66%となっているが、供給可能量ではCaseAで75%、CaseBで78%となっており、供給可能量は降水量ほど渇水の影響は受けていない。

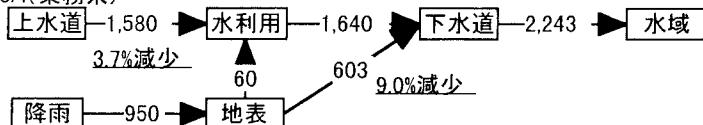
CaseA(業務系)とCaseB(業務系+住宅系)では、CaseBの方が供給可能量が増加するとともに需要供給比も大きくなっており、比較的低層建築物が多く、また雑用水率が小さい住居系への導入に伴い、需要供給比が大きくなったものと考えられる。

1993年

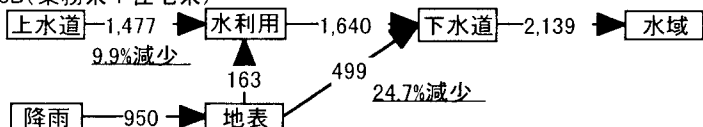
(1)Case0(未導入時)



(2)CaseA(業務系)

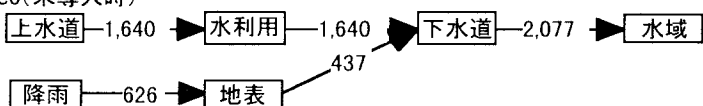


(3)CaseB(業務系+住宅系)

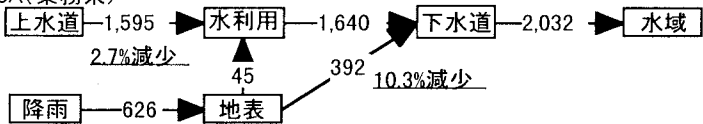


1994年

(1)Case0(未導入時)



(2)CaseA(業務系)



(3)CaseB(業務系+住宅系)

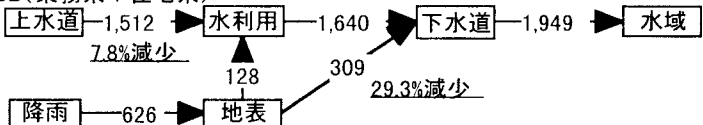


図3 雨水貯留利用施設導入時の都区部全体での水収支(単位は $10^6\text{m}^3/\text{yr}$)と水資源転換効果および雨水流出抑制効果

4.3 雨水流出抑制効果

図3で地表から下水道への流入量の減少率が雨水流出抑制効果を表わすことになるが、1993年(平水年)はCaseAで9.0%、CaseBで24.7%、1994年(渇水年)はCaseAで10.3%、CaseBで29.3%となっており、年間ベースでの流出量の削減効果は比較的大きい。

しかし、雨水流出量の削減効果を評価するには本来そのピーク流量をどれだけ削減できたかで評価すべきであり、出来るだけ短いタイムステップで雨水流出のシミュレーションを行うべきである。本モデルでは1日をタイムステップとしており、雨水流出の解析を詳細に行ううえでは時間間隔が不十分ではあるが、降水日の日流出量でその効果を検討してみる。

図4は、1994年の日降水量と、雨水貯留施設未導入時とCaseBでの直接流出量についての日変動を示している。棒グラフの値がCase0(未導入時)の直接流出量を表わしており、棒グラフの途中にある横線がCaseBにおける直接流出量の値を示している。これから、流出量が大きくなっている日の降水量と直接流出量を抜き出して、表3に示す。

この表は、雨水貯留による流出抑制効果が先行降雨の有無に大きく依存していることを表わしている。流出抑制効果を表わす直接流出量の削減率は日によって違い、30%を超すときもあれば、10%を超えない日も存在する。但し、1年間における最大日流出量で比較すれば、Case0では6月20日の2.76千万 m^3

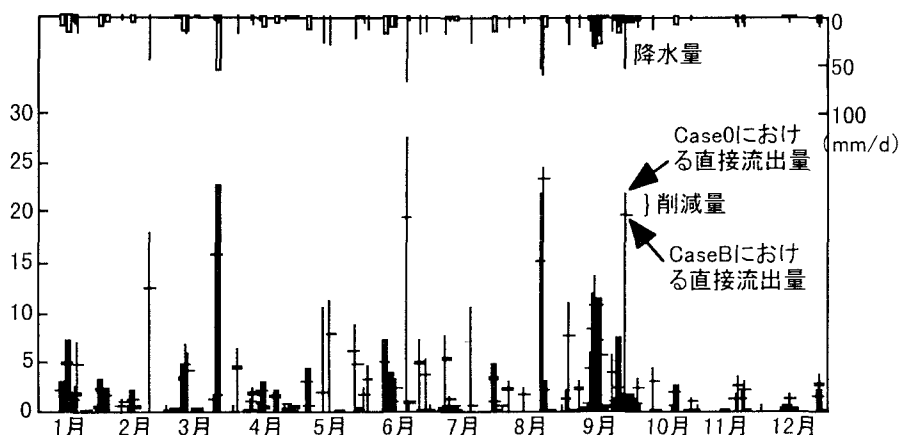


図4 雨水直接流出量の日変動(1994年)

であったが、CaseBでは8月22日で2.33千万 m^3 となり、約16%削減されることになる。

表3 降水量が多くなっている日の日降水量と直接流出量 (1994年)

	平均 降水量 mm/d	Case0での 直接流出量 $10^3\text{m}^3/\text{d}$	CaseBでの 直接流出量 $10^3\text{m}^3/\text{d}$	削減率 %
3月24日	52	22,881	15,743	31.2
6月20日	63	27,634	19,349	30.0
8月21日	50	21,992	15,132	31.2
22日	57	24,823	23,284	6.2
9月14日	27	11,947	8,220	31.2
15日	31	13,597	10,721	21.1
16日	26	11,551	10,604	8.2
17日	18	8,055	7,121	11.6
18日	15	6,525	5,585	14.4
9月29日	51	22,184	19,591	11.7

5. 再生水利用システムの水資源転換効果の評価

都区部全域の対象土地利用用途に対して、各メッシュ毎に地区循環形式、広域循環形式、上流供給式広域循環形式の3種類の再生水利用の雑用水供給システムをそれぞれ導入するシナリオについて、水資源転換効果を検討する。

5.1 シナリオの設定

(1) 地区循環システム

地区循環型の再生水施設をモデル化し、各メッシュデータを1つの供給地区と見なして、メッシュ内の原水として利用できる排水を供給地区の中央に集め、処理して供給する。利用できる原水としては、水質面での問題点を考慮し、水洗便所排水、厨房排水を除いた手洗い排水などの雑排水としている。

利用できる原水量は、雑用水需要量と同様、土地利用用途ごとに水需要量に対する割合を決め、原単位法で求める。供給可能量は対象土地利用用途の雑用水需要量と利用原水量の小さい方としている。

(2) 広域循環システム

下水処理場の高度処理水を用いる広域循環型の再生水施設を図5のようにモデル化している。広域循環システムの対象地域は次の様に求める。

あるメッシュを中心メッシュとし、その中心メッシュから対象地域半径内に含まれるメッシュを供給メッシュとする。供給メッシュでの雑用水需要量の合計を中心メッシュの広域需要量とし、広域需要量が一定量以上ある中心メッシュを広域需要メッシュとする。下水処理場と広域需要メッシュとの距離を処理場距離とし、一定距離以内の広域需要メッシュを広域循環対象地域とする。ここでは、現在実際に広域循環施設が導入されているケースを参考に広域需要量を $3,000\text{m}^3/\text{日}$ 以上、処理場距離を3km以内と設定する。図6にはCaseBにおける広域循環対象地域を示す。新宿、池袋、浅草、浜松町、品川、五反田、蒲田などの地域が対象となる。

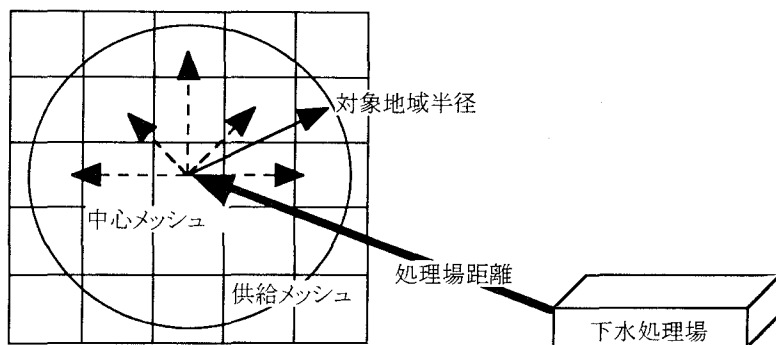


図5 広域循環システムのモデル化

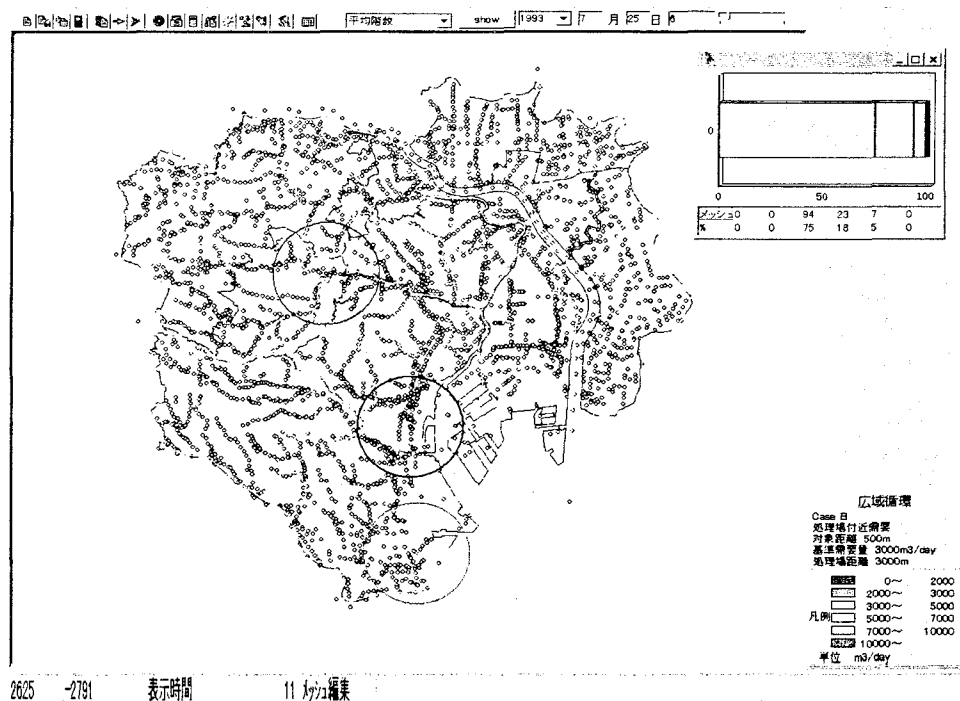


図6 広域循環の対象地域(CaseB)

(3) 上流供給式広域循環システム

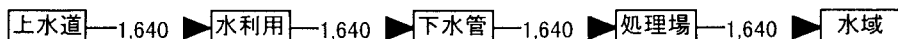
上流供給式広域循環システムとは下水幹線上に処理施設を設け、周辺の雑用水の高需要地域に供給する新たに提案する広域循環システムである。供給地域の選定は、広域循環システムの中心メッシュにあたる部分がマンホールになること以外は同じ手法で行っている。対象地域半径、広域需要量は広域循環システムと同じ値を用いている。広域循環対象地域となる地域は通常の広域循環システムの場合と違って、CaseBの場合、新宿、池袋、五反田、蒲田の他に皇居周辺部や渋谷なども対象となる。

5.2 水資源転換効果

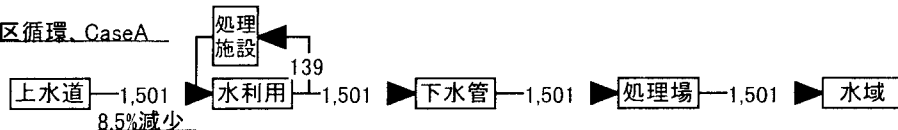
図7に都区部全体での降雨と降雨からの直接流出を除外した水の流れを、再生水利用施設を導入しない場合、地区循環、広域循環、上流供給式広域循環システムのそれぞれを導入した場合のCaseA、CaseBについて示す。上水供給量の減少率が水資源転換効果を表わすことになる。

地区循環システムの導入では、上水供給量の減少率はCaseAで8.5%、CaseBで21.5%となっており、

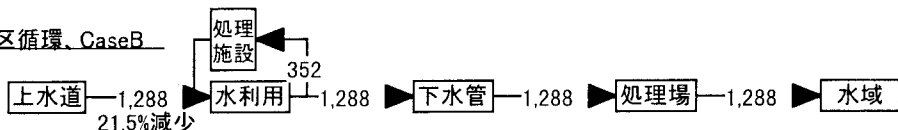
(1)全く導入していない場合



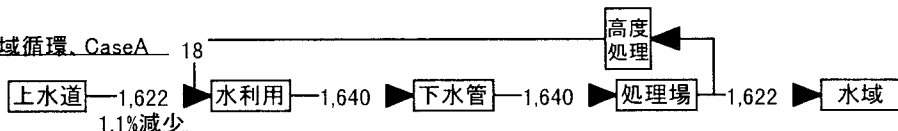
(2)地区循環、CaseA



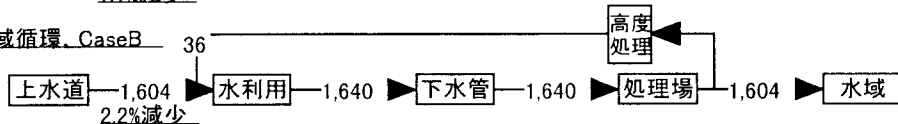
(3)地区循環、CaseB



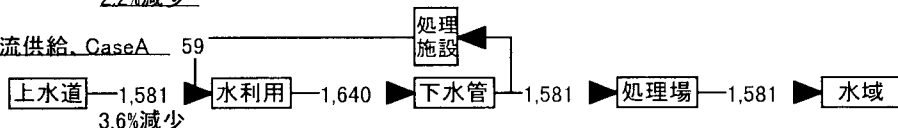
(4)広域循環、CaseA



(5)広域循環、CaseB



(6)上流供給、CaseA



(7)上流供給、Case B

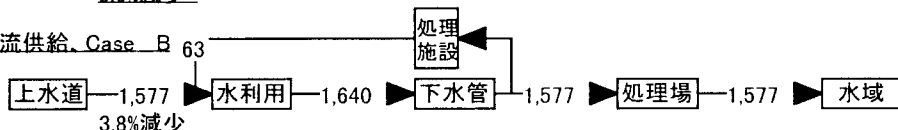


図7 再生水利用施設導入時の都区部全体での人工系の水収支(単位は10⁶m³/yr)

CaseBでは年間約3.5億m³（小河内ダムの貯水容量の約2倍）の水資源が転換できることになる。雑用水需要に対する供給可能量の比である需要供給比はCaseAで73%、CaseBで96%となり、CaseBでは雑用水需要のほぼ全量が地区循環システムによる雑用水供給により賄えることになる。CaseBでは住宅系にも導入することにより需要供給比が増大したが、今回のシナリオでは再生水の原水として水洗便所排水と厨房排水を除いており、業務系だけに導入したのでは再生水の原水が不足しがちなためである。

広域循環システムの導入では、上水供給量の減少率はCaseAで1.1%、CaseBで2.2%でさほど大きくはない。処理場距離の制約を倍以上の7kmとした場合でもCaseBで上水供給量の減少率は6%未満であり、都区部全体で見た場合には主要な代替水源とは言えない状況である。広域需要量が3,000m³/日以上という制約が効いているためであるが、雑用水需要がある程度まとまっていれば、広域循環施設の建設は割に合わなくなるであろう。一方で、広域循環システムでは再生水の原水が下水処理場の処理水なので、安定でかつ豊富な水源であり、需要供給比は100%となる。

上流供給式広域循環システムでは上水供給量の減少率はCaseAで3.6%、CaseBで3.8%となり、通常の広域循環システムと比較すると対象地域が増加する分、水資源転換効果は大きくなる。

6. 雑用水供給システムのコストの比較と最適雑用水供給システムの選定

都区部の各地域でどの形式の雑用水供給システムを導入するのが適切であるかを選定するためには、節水量とコストおよび各システムの導入に伴う環境負荷等から総合的に判断する必要がある。ここでは、各システムの導入時のコストを算出し、経済性という観点から最適な雑用水供給システムの組み合わせについて検討する。

6.1 コストの算出手法

コストの算出にあたっては、コスト関数や耐用年数の設定、利息の考え方などについて多くの仮定が必要であり、それらについて詳細な検討が必要となってくる。ここでは開発したモデルを用いる場合の有用性を示すために、松本の報告⁹⁾を参考にコストの算出を行うが、用いている算出手法やコスト関数等に関しては、今後更に検討していく必要があるであろう。

各システムの導入に伴う年間コストは維持管理費（運転費を含む）と減価償却費の和として求めることとする。減価償却費は定額法により算出することとし、建設費の90%を耐用年数で割ったものとなる。なお、建設費には用地費および建設利息を、維持管理費には金利負担を含まないものとする。建設費および維持管理費算出時のコスト関数については、表4に示す値を用いる。

雨水貯留利用システムについては、建設費は貯留槽容量をパラメータとして算出し、維持管理費は供給可能量に比例して算出している。地区循環システムでは、配水管を含む給排水設備と処理設備の建設費、維持管理費について、供給水量をパラメータとして算出している。広域循環システムについては高度処理施設や配水池などの建設費は日最大給水量をパラメータとして、供給管・配水管の建設費は日最大給水量と配管距離をパラメーターとして算出している。上流供給式広域循環システムについては、処理施設については地区循環システムと同様に、配水池および配水管については広域循環システムと同様の方法で算出している。

供給単価を各システムの年間コストを年間供給可能量で割ったものとして算出する。地区循環システ

表4 コスト計算の設定

	単位	コスト関数
<u>雨水貯留利用システム¹⁰⁾</u>		
建設費	千円	14.022V+3706.9
維持管理費	円／年	80(365Q)
<u>地区循環システム⁹⁾</u>		
給排水設備（事務所建築）	千円	591Q
建設費	千円／年	5.155Q
維持管理費		
給排水設備（住宅建築）	千円	1264Q
建設費	千円／年	8.22Q
維持管理費		
処理設備	百万円	5.10Q ^{0.661}
建設費	千円／年	607Q ^{0.67}
維持管理費		
<u>広域循環システム⁹⁾</u>		
高度処理設備	百万円	7.393Qm ^{0.197}
建設費	千円／年	4.37Q
維持管理費		
配水設備	百万円	18(Qm/2000)+33
配水池建設費	百万円	{3.55(Qm/10000) ^{0.3} +0.018(Qm/10000)+34}L
配水管建設費	—	地区循環システムの給水設備と同様
維持管理費		
<u>上流供給式広域循環システム</u>		
処理設備		地区循環システムと同様
配水設備		広域循環システムと同様

V: 貯留槽容量(m³)、Q: 供給水量(m³/d)、Qm: 最大日供給水量(m³/d)、L: 配管距離(km)

ム以外のシステムでは使用した雑用水を下水道へ排出しており、供給単価に単位水量当りの下水道料金を加えたものを水利用単価として算定する。地区循環システムの場合は、下水道を利用していないので、供給単価と水利用単価は等しいものとする。下水道料金については各メッシュにおける契約件数等の情報がないので、基本料金と従量料金に分けて、現在の料金体系から仮想の料金体系を作成して用いている。

6.2 各システムにおけるコストの算定結果

4、5章で算出した各Case、システム毎の都区部全体における雑用水供給量に対する年間コスト、供給単価、水利用単価の算定結果を表5に示す。なお、雨水貯留利用システムについては1993年の供給量を用いて解析をしている。

CaseAでは、供給単価を見ると、地区循環システムが他と比較して3倍以上大きく、他の3システムは200円/㎡以下である。東京都水道局の水道料金（1994年）では、口径30mm以上、あるいは30mm以上の利用の場合従量料金が200円/㎡以上となっており、それと比較すると水使用量が多いケースではこれらのシステムは経済的であることがわかる。住宅系を加えたCaseBでは、雨水貯留システムと地区循環システムはCaseAより供給単価が下がるものの、広域循環システムと上流供給式システムは供給単価が上がる傾向にある。この原因としては、広域循環システムなどで住宅系の用途も対象に加えた場合に対象地域が増えて、比較的規模が小さめの地域が多く対象地域となったためである。

下水道料金も加えた水利用単価で見ると、CaseAでは上流供給式システムが、CaseBでは雨水貯留システムが最も安価なシステムとなり、いずれのケースでも地区循環システムが最も高価なシステムとなっている。ただし、地域ごとに見ると都心部などの雑用水需要の高い地域では地区循環システムの水利用単価も500円/㎡以下となり、他のシステムより安価となる場合もある。

表5 コスト算定の結果

	CaseA				CaseB			
	雨水	地区	広域	上流	雨水	地区	広域	上流
供給可能量 (m³/日)	165	381	49	162	448	964	99	172
年間コスト(億円)	94	1,052	32	114	222	2,425	71	170
供給単価(円/m³)	156	757	179	193	135	688	196	269
水利用単価(円/m³)	415	757	479	406	387	688	484	559

6.3 各地区での最適雑用水供給システムの選定手法

各メッシュ毎に各システムの水利用単価による比較を行ったところ、CaseAでは79%、CaseBでは92%の地域で雨水貯留システムが最も安価なシステムであった。しかしながら前章でも考察したように、雨水貯留システムは雑用水需要に対する供給可能量の比である需要供給比が小さく、かつ水源が不安定なシステムであり、各地区において実際に雑用水供給システムを導入していく場合に他のシステムとの組み合わせで利用されることが多くなるものと思われる。

そこで、雑用水需要量全量を供給するために水利用単価の安価なシステムから順にその供給可能量だけ供給していくものと仮定して解析を行う。なお、ここでは今まで取り上げてきた4つの雑用水供給システムの他に、通常行われている上水道から供給し、下水道に排出するといったシステムを現状システムとして選択できるようにし、このシステムのコストは水道料金と下水道料金の和として算出することになっている。また、解析の結果、各メッシュにおいて雑用水供給量が最も大きかったシステムをその地区における主要な雑用水供給システムとする。

6.4 都区部全体での結果

図8に都区部全体で最適雑用水供給システムとなるシステムの比率を示す。また、図9にはCaseBにおける最適雑用水供給システムの分布状況を示す。CaseAで現状システムを含めた場合は73%の地域において現状システムが最適雑用水供給システムとなる。次に最適雑用水供給システムとなる地域が多いシステムは雨水貯留システムであり、19%の地域が主に都心から離れた地域に点在してする。このような

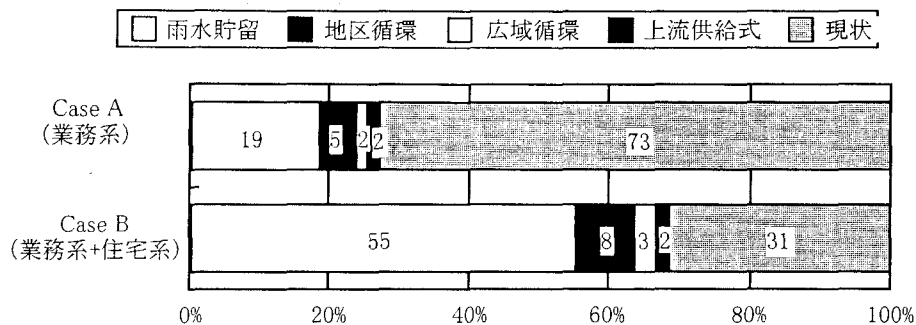


図8 各システムが最適雑用水供給システムとなる比率

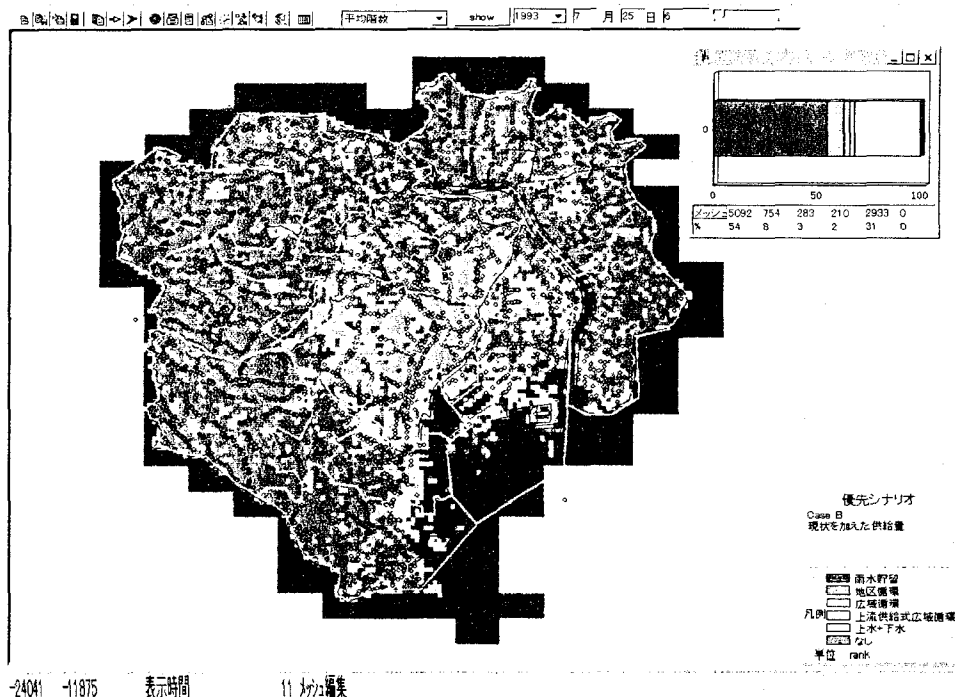


図9 CaseBにおける最適雑用水供給システムの分布

地域の特徴として、雑用水需要量とはあまり関係なく、対象土地利用用途の平均階数が2階程度であることが挙げられる。平均階数が3階以上の地域では雨水貯留システムの需要供給比が30～40%であり、上水道による供給が最もよいことになる。

CaseBで現状システムを含む場合では、現状システムが最適な供給システムは31%と減少している。代わりに雨水貯留システムが最適なシステムとなっている地域が増加し、全体の55%を占めている。これは、低層な建物が多い独立住宅が対象として加わり、需要供給比が増加したためと思われる。また地区循環システムも3%増加している。地区循環システムにおいては雑用水需要量自体も増加しているのに加え、住宅系の再生水原水量は雑用水需要量よりも大きく、需要供給比が増加しているため雑用水需要量以上に供給可能量が増加し、水利用単価が減少していることによる。

地域ごとに最適な雑用水供給システムを導入した場合、現状システム以外による供給量は、CaseAで25.4万 m^3 /日で水需要量全体の6%、CaseBで77.1万 m^3 /日で水需要量全体の17%になる。多摩川からの取水量が日量115万 m^3 であることから、77.1万 m^3 /日を雑用水供給システムによって供給できる場合、多摩川の水取水量の2/3を供給でき、多摩川の流量は平均流量にして約9 m^3 /sの増加が期待できることにな

る。この結果から、東京都区部における水資源を新規に開発しようとした場合、雑用水供給システムの広域的な普及は代替水源の1つとして考えることができる。

7. 結論

本研究では、東京都区部を対象として、土地利用や建物情報、下水管網や河川のGISデータを組み合わせた分布型の人工系水循環モデルを構築し、雨水利用、あるいは地区循環や広域循環による再生水利用といった、さまざまな形態の雑用水供給システムの導入時の節水効果や雨水流出量削減効果を定量的に評価した。さらに、雑用水供給システム導入に伴うコストを算出し、経済的な観点から地域ごとに最適な雑用水供給システムを検討した。

ここで開発したモデルにより、それぞれの雑用水供給システムの特性について把握する事ができ、地域ごとに最適な雑用水供給システムを選択した場合、既存の上水道料金よりも安価であるうえに、都区部全体の水需要量の17%を供給できる、など雑用水供給システムの導入施策を検討していくうえでさまざまな知見が得られた。ただし、今回の解析で用いたコストの算出手法については、今後詳細な検討が必要であるものと思われる。また、ここで挙げたシステム以外にも雑用水の供給、利用形態があり、それらについても評価の対象として加える必要がある。

ここで開発したモデルのように、コンピュータ上で仮想的に各種の計画をシミュレートしてさまざまな効果や環境影響など有用な情報を提供するツールは、一般市民による政策立案プロセスへの参加という観点からも必要性が高いものであり、さらにモデルを改良して精度を上げていくとともに、利用しやすい形のモデルとしていく必要がある。一方、コンピューター技術の発達とともにGISが広く普及してきており、精度の高い地域情報がGISデータとして整備されつつある。これらのデータを利用して、今後さまざまな都市や地域において、雑用水供給システムばかりでなくさまざまな水循環に関する施策の評価が行われていくものと考えられる。

最後に、本研究の実施にあたっては、東京都下水道局よりさまざまなご支援を頂いている。ここに記して謝意を表したい。

参考文献

- 1) 和田安彦、三浦浩之、多田律夫、尾崎平：節水型都市構築のための都市内水資源有効利用の研究、土木学会論文集、No. 622/VII-11、59-71、1999
- 2) 巖斗鎔、楠田哲也、石川和也：渇水に見舞われやすい流域における水資源確保対策の検討とその評価ー博多湾流域を対象としてー、土木学会環境工学研究論文集、Vol. 35、61-71、1998
- 3) 杉本留三、荒巻俊也、松尾友矩：GISを用いた水収支モデルによる雨水貯留施設の導入可能性の検討、第35回環境工学研究フォーラム講演集、89-91、1998
- 4) 尾島俊雄研究室：建築の光熱水原単位「東京版」、早稲田大学出版部、1995
- 5) 空気調和・衛生工学会：空気調和衛生工学便覧、1996
- 6) 空気調和・衛生工学会：雨水利用システム・設計と実務、1997
- 7) 日本下水道協会：下水道統計・行政編、平成2年度～6年度版
- 8) 東京都環境保全局：水収支調査中間報告
- 9) 松本重行：都市の水循環システムの複数指標による評価、東京大学大学院工学系研究科修士論文、1994
- 10) 雨水貯留システム浸透技術協会：雨水利用ハンドブック、山海堂、1998