

# 準三次元地下水流動モデルを用いた 都市化域における水循環分析

Analysis of Water Circulation in Urbanized Area Using Quasi 3-D Subterranean Water Flow Model

研究第一部 次 長 田 中 長 光  
研究第三部 主任研究員 上 野 久

Hydrological cycle problems have been occurring in various forms including increased run-off of flooding, decreased river discharge at normal times, worsening of water quality and affected ground water, in urbanized areas where urban development has been progressing rapidly, the utilization of ground water has been excessive and construction of sewage systems has advanced.

Methods such as those for achieving infiltration and storage of storm water were adopted to cope with the above-mentioned troubles, and their efficacy has been evaluated; however, most facilities have been evaluated by non-physical models. This paper reports the results of hydrological cycle analysis we carried out by handling the ground water flow from a quasi 3-D viewpoint using a distribution type physical model of the basin of the Saka river, which is the left tributary of the Edo river.

Key words: basin's urbanization, hydrological cycle, ground water, distribution type physical model, permeation of rain water

## 1. はじめに

都市化の進展は、その地域の河川の洪水時の流量の増加と平常時の流量減少および水質悪化をもたらしてきた。治水対策のために川幅は広げられコンクリート三面張の水路となり、地下水利用の増加と下水道の進捗は低水流量を減ずることとなり、都市河川の都市施設としての環境の観点から課題が多く、健全な水循環の回復の要請が高い。

千葉県東端に位置し、都市化の激しい松戸市等を流域とする江戸川左支川の坂川は、低水流量の減少、水質悪化が著しい上、近年常磐新線による都市開発が予定され、維持流量の確保と洪水対策が急がれている。対策の立案にあたっては、水循環機構の究明が必要であり、地下水流動機構及び河川流出特性を現地観測結果等に基づいて詳細な把握を試みるとともに、分布型の水循環解析モデルを構築し、現況の水循環機構を定量的に評価した。また、同モデルを用いて過去から将来の流域水循環システムを推定し、その問題点・課題を明らかにして、対策案の提案を検討することとしているので概要を報告する。

## 2. 坂川流域の概要

### 2-1 流域概要

坂川は、江戸川左岸の下総台地を源とし、松戸市街地を貫流し根本地先で新坂川を合流した後、納屋川岸で一部を分流し、赤塚樋門より江戸川に落とし、下矢切柳原水門において江戸川へ合流する流路延長16 kmの一級河川である。

流域面積53.9km<sup>2</sup>のうち64%をしめる34.7 km<sup>2</sup>が都市計画法による市街化区域に定められており、上流部においては最近特に区画整理事業等による宅地開発が急速に進行している。

都市化の指標となる流域関係市別人口推移を表2-1に、土地利用の変化状況を図2-1に示す

表2-1 流域関係市別人口推移

Table 2-1 Population transition for each city related to river basin (Unit: 1,000 persons)

(単位：千人)

年代	松戸市	柏市	流山市	計
1950	53	42	29	124
60	83	61	25	169
70	253	151	56	460
80	401	239	107	747
93	464	317	146	927

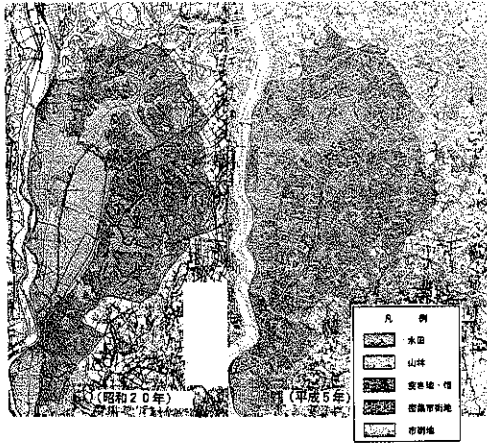


図 2-1 流域の土地利用変化

Fig. 2-1 Changes of land use in the river basin

### 2-2 水理地質構造

坂川流域は地形的に常磐線以南の東部に分布する高位段丘（標高25から30m）、常磐線以北に分布する中位段丘（標高20から25m）、流域西部に広がる沖積低地（標高3から5m）、および台地と低地の境界部に分布する緩斜面の4つに区分される。

流域の地質分布は上記の地形区分と対応し、高・中位段丘部は下位から木下層（砂層主体、ときに泥層を挟在する）、常総粘土層（下末吉ローム層相当の火山灰質粘性土、一部砂層を挟む）、関東ローム層が堆積しており、沖積低地部は下位から木下層と沖積層（砂・泥

互層）が堆積している。また、緩斜面には台地に分布するローム等の浸食・再堆積物が堆積している。

既存のボーリング資料および現地調査成果等をもとに作成した水理地質図を図2-2に、推定水理地質断面図を図2-3に示す。

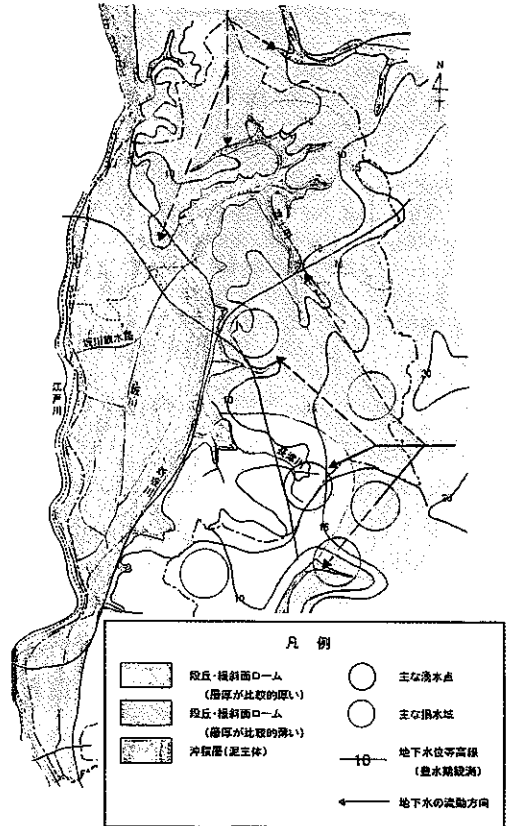


図 2-2 水理地質図

Fig. 2-2 Hydrogeological map

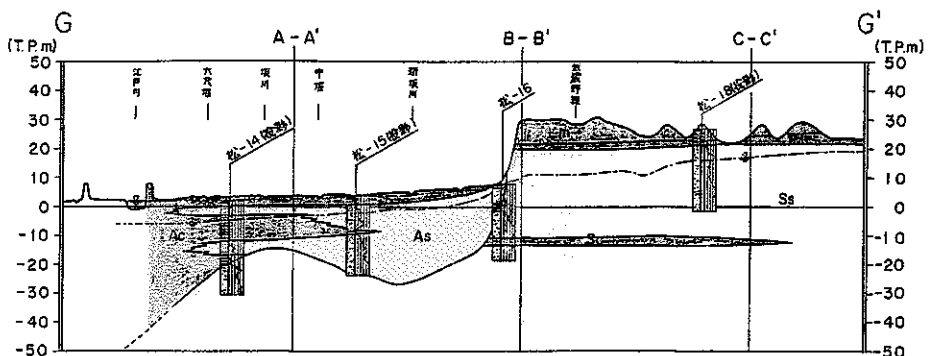


図 2-3 推定水理地質断面図

Fig. 2-3 Hypothetical hydrogeological section diagram

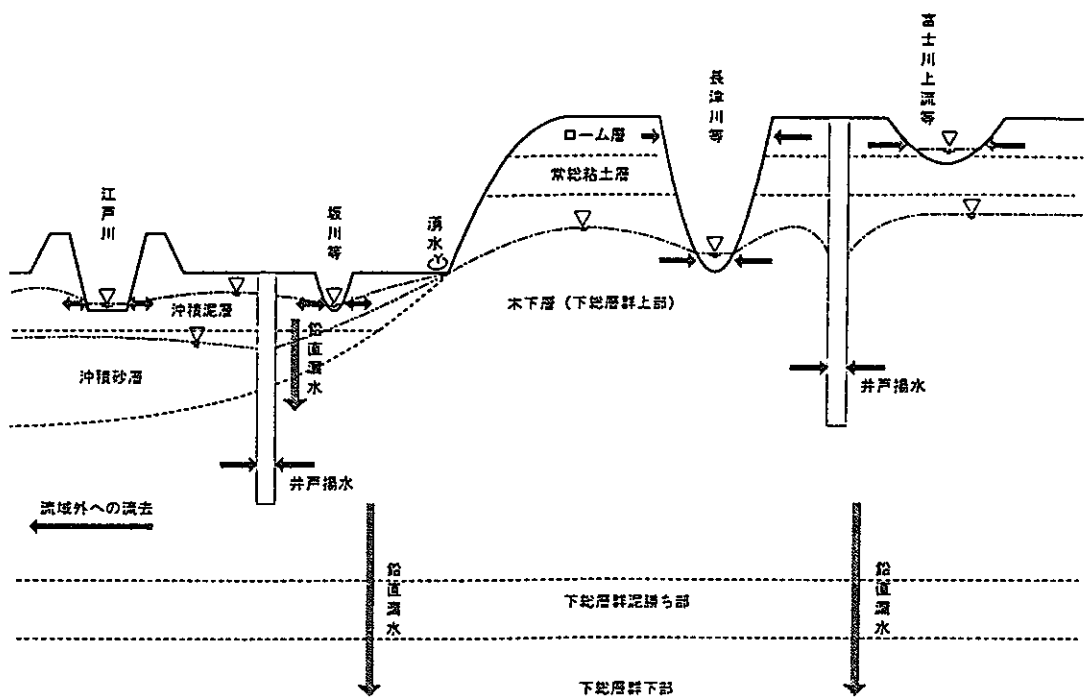


図 2-4 流域の地下水流動概念図

Fig. 2-4 Conceptual illustration of ground water flow in river basin

台地部にはほぼ全域に関東ローム層と常総粘土層が堆積し、流域の南側で厚く、北側にむけて徐々に層厚を減じていく。沖積低地の上部には厚さ5から10mの泥質層が分布し、その下には場所により最終氷河期に形成された深い埋没谷とそれを埋める沖積砂層が分布する。台地、低地を通じてこれらの下位に砂質層からなる木下層が分布する。

断面図には、湧水期の地下水位をあわせて記入してある。台地部では、ローム層中の宙水位をのぞくと木下層の水位があるだけなのに対し、低地部では、沖積泥層中の水位と木下層中の水位の2つの水位が存在する。これは、沖積低地部での揚水の影響の結果と考えられ、台地の主部から沖積低地部へ木下層中を流動してきた地下水は、透水性の低く、かつ地下水ポテンシャルの高い泥層中に流入するよりも、透水性が高く、揚水により地下水ポテンシャルが低下している低地部木下層に選択的に流入しているものと思われる。また

上位の泥層からは下位の木下層対して、両者の水頭差に応じた地下水の垂直漏水補給が生じているものと考えられる。

地下水の利用については、千葉県および各市資料ならびに現地確認調査により整理した。流域3市とも利用がきわめて盛んで、用途別で最も大量の揚水を行っているのは水道用水で松戸市、柏市では昭和45年に比べてほぼ倍増、流山市に至っては約4倍の増加を示している。また、その利用量のほとんどが木下層中の地下水でまかなわれていると考えられる。

### 3. 水循環解析モデルとその検証

#### 3-1 水循環解析モデル

都市化域の水循環の概念を図3-1に示すが、自然系と人工系の要素が相互に干渉しあい、きわめて複雑な現象となっている。

この検討で適用する水循環解析モデルは、同図に示した現象を、分布型にかつ物理モデルとして扱う。



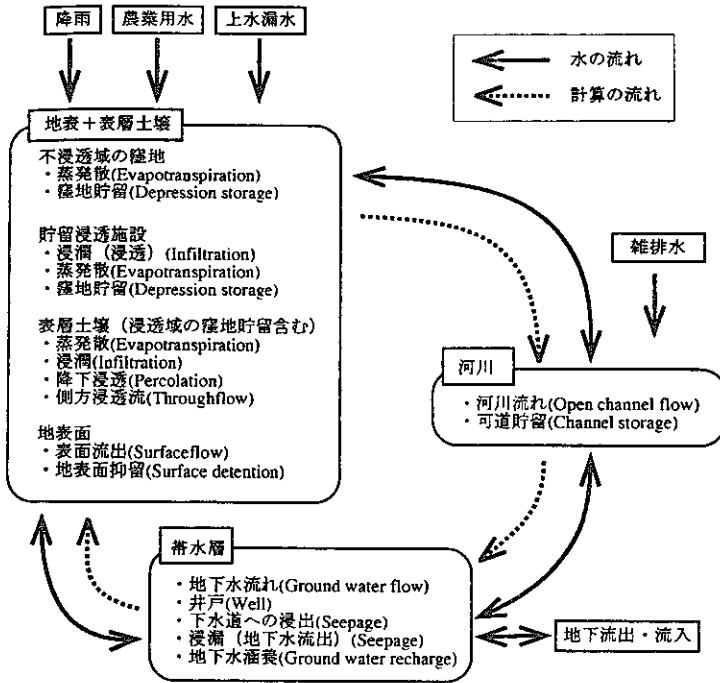


図3-4 計算の流れと各部で扱われる現象

Fig. 3-4 Flow of calculations and phenomena handled in each section

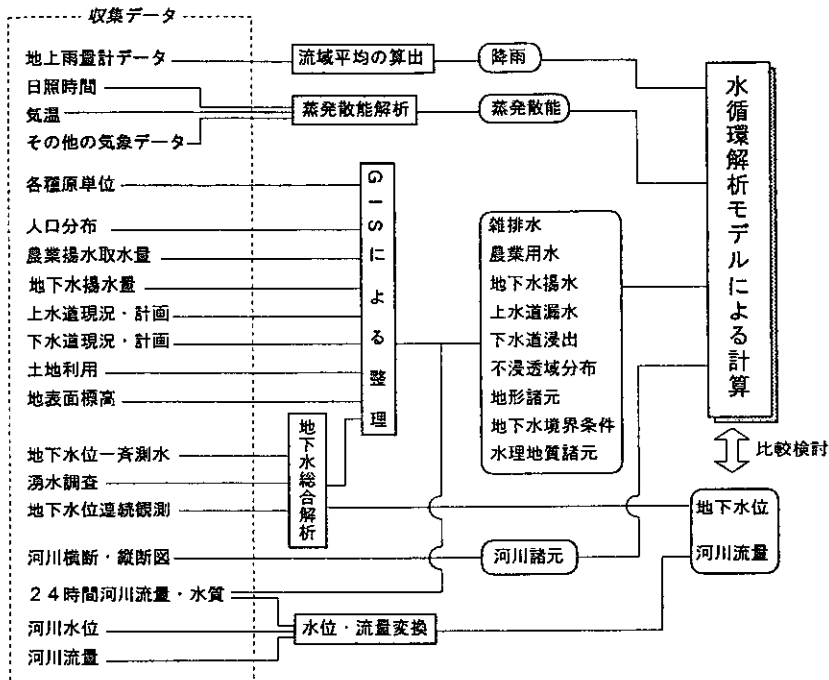


図3-5 水循環構成要素の把握と解析の流れ

Fig. 3-5 Understanding of hydrological cycle constituent elements and flow of analysis

### 3-2 再現検証

諸種の検討の結果500mメッシュで作成したモデルを用いて、平成5年1月1日から平成8年9月30日までの再現計算を行った。モデルの精度を検証した結果、河川流量、地下水位について良好な再現性を確認した。

それぞれについて以下の通りである。

#### (1) 河川流量

図3-6に河川流量観測地点における平成8年9月の台風での洪水の流量観測結果に対

する計算結果を比較した。ハイドログラフの目視より、計算結果は基底流出量、洪水時のピークで良好な再現性を示しているといえる。

#### (2) 地下水位

地下水位連続観測期間での計算結果と観測結果を代表地点について図3-7に示した。水位の変動傾向、変動幅ともによく一致した結果が得られており、当該流域の地下水特性を十分再現しているといえる。

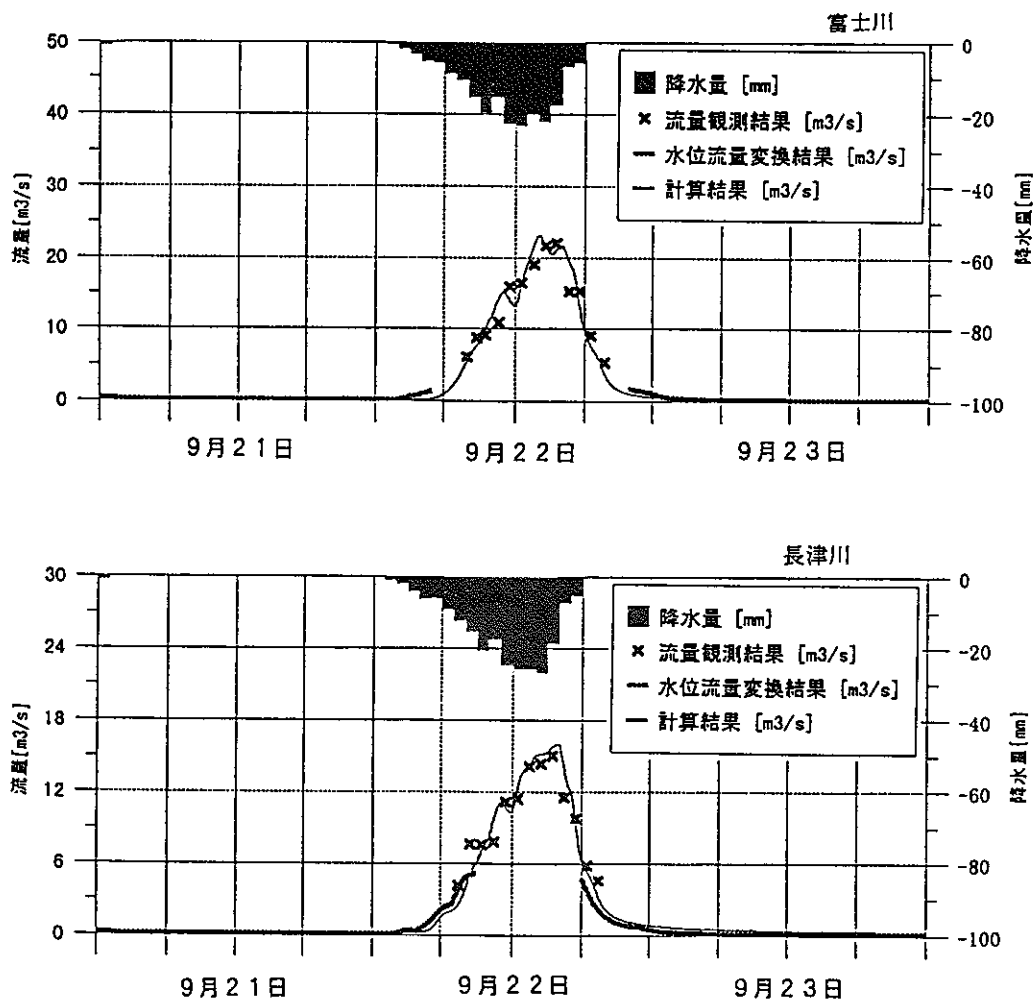


図3-6 平成8年9月22日台風での再現性検討  
Fig. 3-6 Simulation of typhoon of September 22, 1996

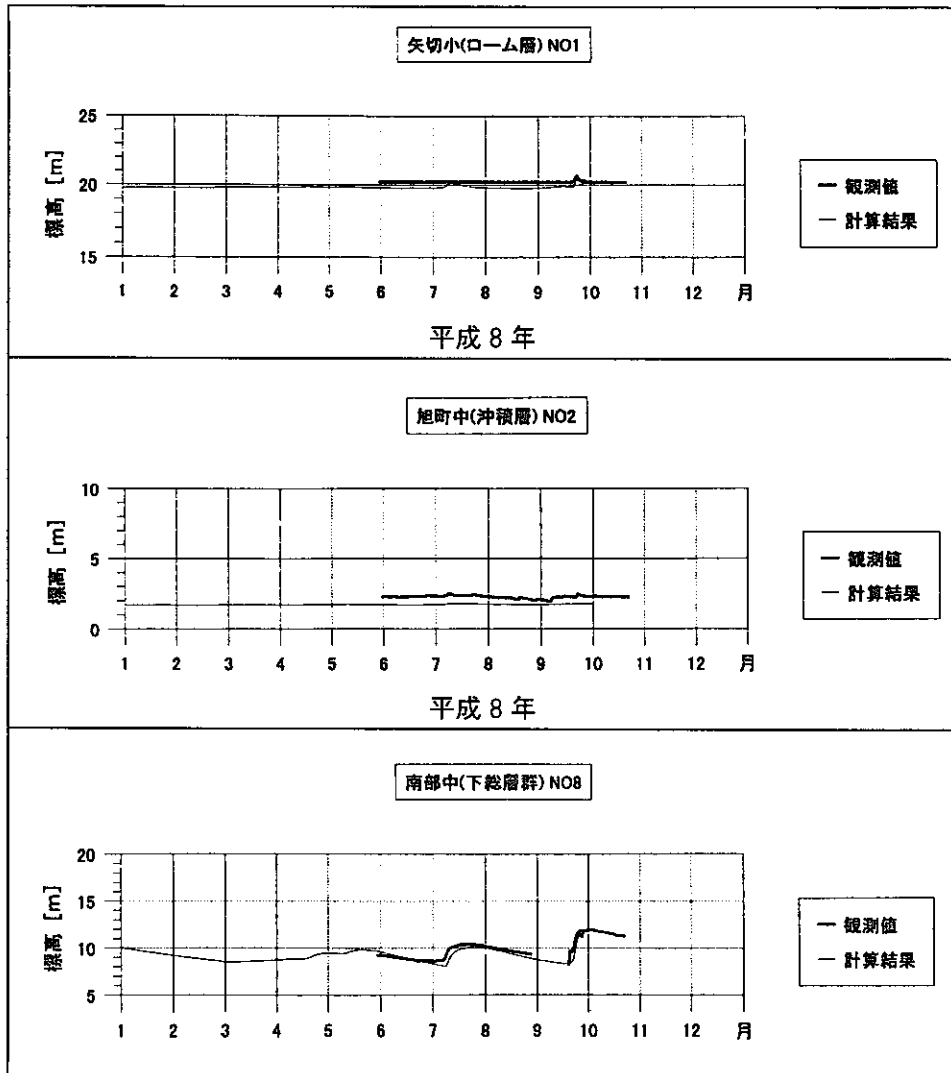


図 3-7 地下水変動による再現性の検討

Fig. 3-7 Simulation of fluctuations of subterranean water (Part 4)

#### 4. 水循環システム

##### 4-1 水循環構成要素の影響度

水循環構成要素の影響度を明確にするため、同一の社会条件下で着目する要素のみを変化させた場合の年間水収支シミュレーションを行った。着目する要素は以下に示す5つとし、社会条件の対象は、将来想定ケース（平成23年）とした。

降雨量および蒸発散能は、渇水年(平成6年)

データを用いた。表4-1、表4-2に各水循環構成要素の影響度の算定結果を示す。

表4-1 水循環構成要素影響度(坂川全流域)  
Table 4-1 Degrees of influence of hydrological cycle constituent elements  
(entire basin of Saka river)

水循環構成要素		過去	現在	将来	農業用水供給なし	上水道漏水なし	下水道浸出なし	井戸揚水なし	土地利用(現在)
雨	1	971.79	971.79	971.79	971.79	971.79	971.79	971.79	971.79
雑排水	2	55.23	438.77	164.30	164.30	164.30	164.30	164.30	164.30
河川への中間流出	3	265.78	100.64	77.28	55.05	69.10	62.64	87.29	78.68
河川への地下水流出	4	158.84	-18.71	-40.69	-40.46	-51.51	-2.01	60.92	-30.12
河川への蒸発流出	5	192.83	289.49	397.84	390.62	397.14	398.51	399.03	396.21
第1帯水層への水平方向地下水流入	6	-1.32	-1.32	-1.32	-1.32	-1.32	-1.32	-1.32	-1.32
第2帯水層への鉛直方向地下水流出	-	-45.17	-128.88	-136.11	-131.09	-135.31	-108.08	-56.55	-133.30
第2帯水層への水平方向地下水流入	6	-17.64	-2.52	3.59	3.44	6.90	-3.68	-9.98	-0.42
第3帯水層への鉛直方向地下水流出	7	-152.93	-121.01	-118.25	-120.04	-114.40	-120.19	-149.45	-120.84
蒸発散	8	600.66	348.96	268.28	256.81	266.46	268.57	270.28	340.13
表層土壌からのかん養	9	399.10	337.42	320.34	314.16	294.20	314.14	307.11	341.25
トレンチへの流入量	10	0.00	71.60	71.60	71.60	71.60	71.60	71.60	71.60
トレンチからのオーバーフロー	11	0.00	21.95	21.95	21.95	21.95	21.95	21.95	21.95
トレンチからの浸透量	12	0.00	49.65	49.65	49.65	49.65	49.65	49.65	49.65
下水道流入水量	13	0.00	89.37	89.37	89.37	89.37	0.00	89.37	89.37
上水道漏水	14	0.00	21.67	37.45	37.45	0.00	37.45	37.45	37.45
農業用水供給量	15	619.31	81.02	47.09	0.00	47.09	47.09	47.09	47.09
第1帯水層からの農業用水汲み上げ	16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
第2帯水層からの農業用水汲み上げ	16	0.00	14.59	9.13	0.00	9.13	0.00	0.00	9.13
第1帯水層からの汲み上げ	17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
第2帯水層からの汲み上げ	17	55.23	245.91	245.91	245.91	245.91	245.91	0.00	245.91
貯留施設への流入	18	0.00	8.08	8.08	8.08	8.08	8.08	8.08	8.08
貯留施設からのオーバーフロー	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
貯留施設への流出量	20	0.00	8.08	8.08	8.08	8.08	8.08	8.08	8.08
処理排水	21	86.49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
農業排水	22	532.82	66.43	37.95	37.95	37.95	37.95	37.95	37.95
農業用水の河川への還元量	23	159.85	19.93	11.39	11.39	11.39	11.39	11.39	11.39
地場開放流量	24	0.00	31.82	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
流域外への維持排水量	25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表4-2 他の水循環構成要素への影響度合  
Table 4-2 Degrees of influence of other hydrological cycle constituent elements

	表面流出量	中間流出量	地下水流出量	蒸発散量	浸透量	コメント
1) 農業用水	-7	-12	0	-11	-6	水田から表層土壌への浸透量が減る。河川への流出量が減少している。
2) 上水道漏水	-1	-8	-11	-2	-26	表層土壌水分量が減少する。地下水流出の減少傾向が大きい。
3) 下水道浸出	+1	+6	+39	+1	-6	地下水位が上昇する。河川への流出が増加している。
4) 地下水揚水	+2	+10	+102	+2	-13	地下水位が上昇する。河川への流出が増加している。地下水流出の増加が大きい。
5) 土地利用	-92	+2	+11	+72	+21	浸透域面積の違いにより表面流出が増大している。蒸発散量も増加している。

(単位: mm/年)



### (1) 農業用水量の影響度

流域内から全ての農地が消失した場合を想定して、農業用水量をゼロとした場合は、水田からの表層土壌への浸透が減るため、河川への中間流出、蒸発散、表層土壌からのかん養において減少傾向となっている。

### (2) 上水道漏水の影響度

流域内の水道管が全てリニューアルされた場合を想定して、上水道漏水量をゼロとしたときは、表層土壌水分量の減少による河川への各流出成分の減少として現れている。特に、地下水流出の減少傾向が大きくなっており、地下水位の低下が伺える。

### (3) 下水道浸出水量の影響度

流域内の下水道管への地下水の浸入がないことを想定し、下水道浸出水量をゼロとした場合は、地下水位は高いレベルで保たれる結果となっている。地下水位が高いことによって、表層土壌からのかん養は抑制され、このことにより河川への流出が増加している。

### (4) 地下水揚水量の影響度

流域内において、地下水揚水が規制された場合を想定し地下水揚水量をゼロとしたときには、下水道浸出量を無くした場合と同じ傾向で現れている。河川への地下水流出における違いは大きく、年間では約100mm/年も増加している。

### (5) 不浸透域分布の影響度

将来の不浸透域分布の代わりに現在のものを用いたときには、自然地を今のまま保全することになり、浸透域面積の違いにより表面流出、蒸発散において、大きな影響が現れている。

## 4-2 過去・現在・将来の水循環システム

渇水年（平成6年）の降水量と蒸発散能を与えた場合の過去（昭和20年）と将来（平成23年）の再現および予測結果で示されたものを、現在（平成6年）の結果と比較した。流況をハイドログラフで図4-1に、年間水収

支図を図4-2に示す。基底流出量、ピーク流出量、地下水位、表層土壌への浸透量のそれぞれについては、以下の通りである。

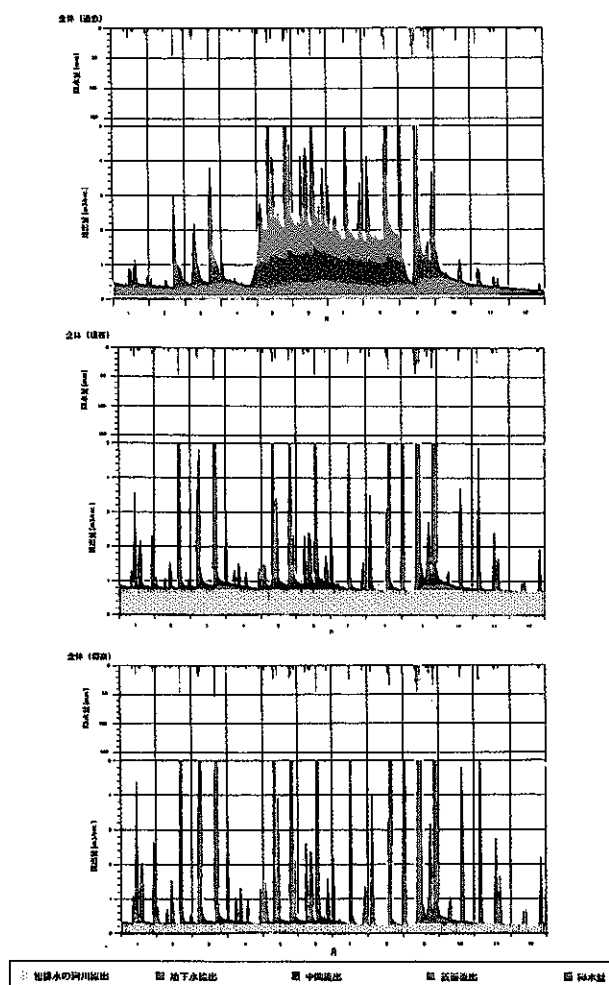


図4-1 流出成分とハイドログラフの比較（流域全体）

Fig. 4-1 Comparison of run-off components with hyetograph (entire basin)

### (1) 基底流出量

流出成分のハイドログラフの比較から、基底流出成分は過去では地下水流出が、現在および将来では雑排水の河川流出が大半を占めている。

### (2) ピーク流出量

過去から将来にかけて、ハイドロのピーク

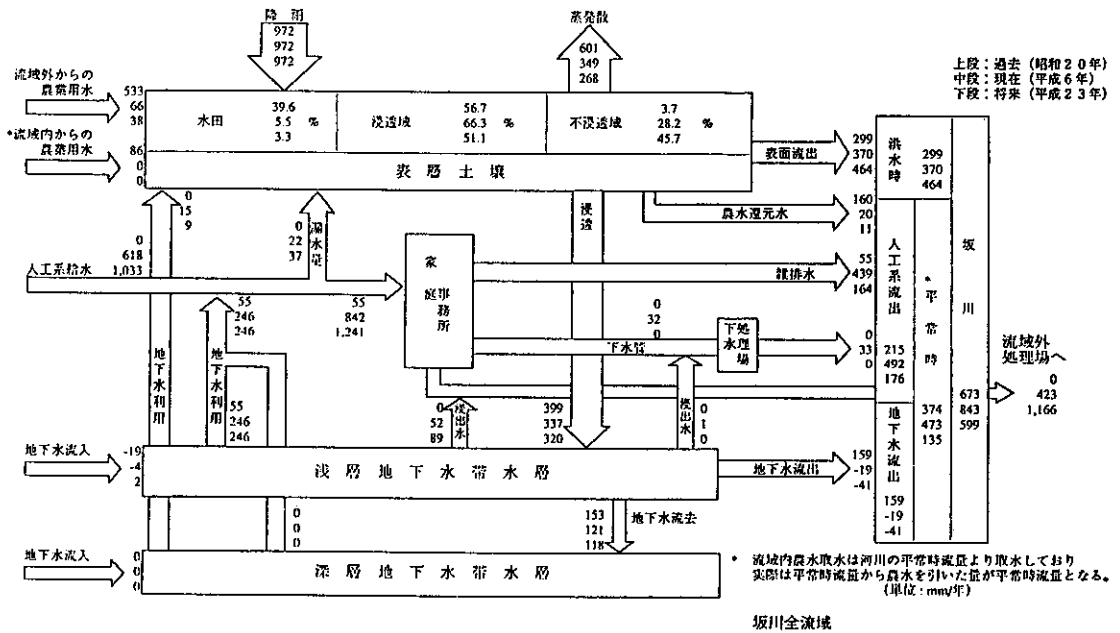


図4-2 坂川流域水収支図 [過去・現在・未来]

Fig. 4-2 Saka river basin water balance diagram [past, present, future]

の先鋭化が顕著にみられる。これは、不浸透面積率の増大により直接流出成分が増加したためである。その流れは、浸透現象やパイプ流などに比べて非常に早いことから、小降雨時のピーク流出の増大が著しい。

### (3) 地下水位

過去と現在の結果を比較すると、ほぼ全域で過去の地下水位の方が高い結果となっている。現在と将来との比較では、地下水涵養量が減ったことにより、将来の地下水位が現在よりも1から2mほど低くなっている。

### (4) 表層土壌への浸透量

過去から将来にかけて、表層土壌への浸透量が激減している。これは、土地利用の変化に伴う不浸透域の増大を示すものである。

## 5. 水循環保全対策

### 5-1 問題点と課題

水循環解析モデルによる過去、現在および将来の水循環機構の推定結果および水循環機

成要素の影響度検討結果に基づいて、坂川流域の抱える水循環上の問題点と課題を河川平常時流量と洪水流量に着目して整理する。

#### (1) 平常時河川流量

##### 1) 人工系流出量の減少

図5-1の(1)に示すとおり、下水道整備により河川へ放流されていた生活雑排水が流域外の処理場へ運ばれるために、河川流量は低下し、その影響はきわめて大きい。河川水質の改善には下水道整備は不可欠なため水量減少はやむを得ない面もあるが、河川流量の減少に対する何らかの対策が必要となる。

##### 2) 地下水流出量の減少

地下水が河床から浸出したり、湧水として河川へ流れ込むものなど、地下水を水源として河川へ流出するものを総称して地下水流出量と呼んでいる。一般に自流量ともいわれ自然の水循環の結果として生じてくるものであるため、きわめて人工的な変化の影響を受けやすい。図5-1の(2)に地下水流出量(年間

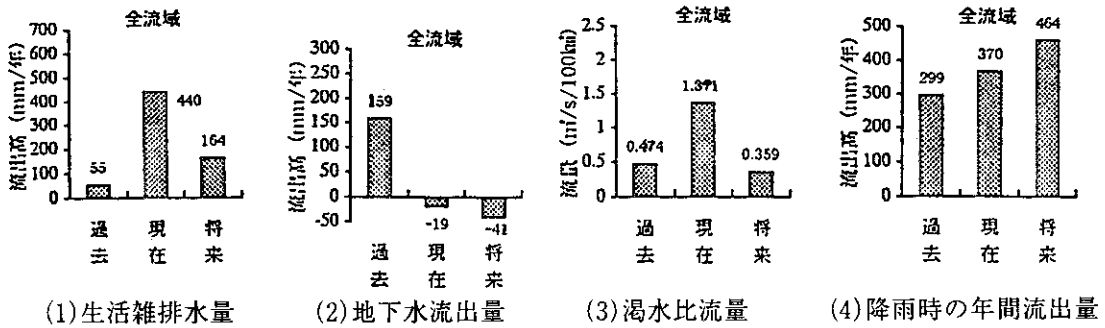


図5-1 水循環年代別比較

(過去：昭和20年代、現在：平成6年、将来：平成23年)

Fig. 5-1 Chronological comparison of hydrological cycle  
(Past: 1945 ~ 1954, Present: 1994, Future: 2012)

流出高)の変化を示すが、過去から将来にかけて減少傾向にあることがわかる。

このことに関する問題点と課題は以下の通り整理される。

- ・現在の地下水利用は地下水位を過去の状況より大きく低下させ、地下水が河川へ流出し難がたい地下水流動機構となっており、地下水位の復元が課題となる。
- ・都市化により不浸透面積が増加し、降雨の地下浸透量が減少するために地下水流出量が減少する。
- ・下水道整備に伴い下水管へ浸入する地下水がふえる。今後下水道整備が進むと浸出量は増加し、下水管の漏水対策が必要となる。
- ・新規に開発される地区への対策と併せて、既成市街地へ対策を実施する事が効果的である。

### 3) 湧水流量の減少

将来の人工系流出量および地下水流出量ともに現在よりも減少するため、河川の平常時流量は当然減少することになる。図5-1の(3)に湧水比流量 (m<sup>3</sup>/s/100km<sup>2</sup>) の比較を示すが、将来の湧水比流量は現在の30%前後の値まで落ち込むことがわかる。このように将来の河川流量はきわめて少なくなることが予測され、平常時流量の確保が重要な課題となっている。

### (2) 洪水流量

#### 1) 表面流出量 (年間流出高)

図5-1の(4)に表面流出量 (年間流出高)の年代別の比較を示すが、過去から将来にかけて増加している。また、図5-2に不浸透面積率と洪水流出量の関係を示すが、両者はほぼ比例関係にあり、洪水流出量の増加は都市化による不浸透面積率の増加が原因であることは明らかである。

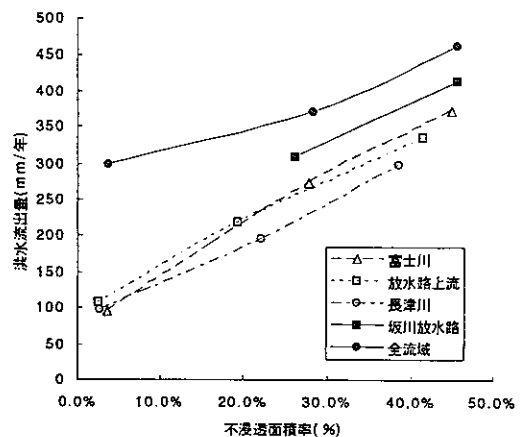


図5-2 不浸透面積率と洪水流出高の関係

Fig. 5-2 Relationship between percentage area of impermeable layers and amount of flood run-off

## 5-2 対策案の検討

水循環の保全・再生、洪水制御に有効と考えられ、かつ坂川流域で有効と思われる対策案の選定を行った。対策案は各戸貯留・浸透などの分散型対策と調節池などの集中型対策とに大別できる。表5-1に検討対象とする

対策を整理した。

各対策案の具体的な機能効果の評価と経済効果について、現在検討中であり、最適案の提案にむけて作業を急いでいる。いずれ機会を得て報告することとしたい。

表5-1 対策候補の一覧  
Table 5-1 List of proposed measures

対策名	内容
1.農地、自然地の保全	市街化区域および常磐新線開発区域の水田、畑、山林・荒地が保全される。
2.雨水浸透施設	対象施設は拡水法とし、対象地域は自治体の指導基準にとらわれず幅広く設定する。
3.雨水貯留施設	開発行為への義務づけは既存の指導基準に準じ、これに加え公共施設や集合住宅におけるオンサイト貯留、さらに一般住宅でのガレージ貯留を対象とする。
4.下水管のリニューアル (漏水防止対策)	下水道の主要幹線に漏水防止対策を施し、地下水の浸出を防ぐ。
5.地下水利用規制	生活用に揚水している地下水を規制する。
6.河道改修	坂川放水路では現況河道の掘削により流下能力の向上を図る。
7.調節池	坂川放水路では河川沿いに調節池を建設する。
8.地下河川(分水路)	坂川放水路では千葉県計画に基づく地下分水路を建設する。