

## 水資源連関表を用いた水循環の把握

宮井貴大\* 柏井条介\*\*

### 1. はじめに

良好な水辺環境を保全、創出するため、また、渴水に強く効率的な水資源利用を行うため、水資源管理においても水循環系に配慮した施策の展開が求められるようになっている。こうした要請に応えるため、筆者らは、これまで水循環系に基づく水資源管理のあり方を検討するため、水循環システムを作成してきており、前報<sup>1)</sup>では第一報として、水循環系の現状把握において中心的な役割を果たす GIS の利用方法の検討とデータベースの設計について報告した。本報文は、その続報であり、水循環系の現状把握を行うために、水利用が比較的盛んなモデル領域を対象に、先のデータベースを用いて日単位の水資源連関表を作成した。また、河川流量の超過確率に応じた水循環図を作成し、水循環状況の把握を行った。

### 2. 水資源連関表の作成

#### 2.1 対象領域

検討対象領域（以下、「モデル領域」という）の概要を図-1に示す。モデル領域は、流量観測所を考慮して水利用の盛んな平野部が5割近くを占めており、また中流域に位置している地域（面積約42.14km<sup>2</sup>）とし、流量観測所の集水域毎に3地区に分割した。水循環の状況は水資源連関表<sup>1)</sup>を用いて行っており、分割した地区毎に存在する水資源関連要素とその施設一覧を表-1に示す。

表-1 各地区に存在する水資源関連要素と施設一覧

水資源関連要素	A 地区	B 地区	C 地区
1 河川	上水道取水（H 広域水道、b 市水道）、本川流量観測所	上水道取水（c 市、d 町）、農業取水（B 井堰掛）、本川・支川流量観測所	農業取水（C・D・E・F 井堰掛）、農業排水（C・F 井堰掛）、本川流量観測所
2 地下	b 市工業取水	c 市上水道取水、b 市工業取水	b 市・c 市・g 市上水道取水、a 市・b 市・c 市工業取水
3 上水道	H 広域水道、a 市・b 市・c 市・d 町水道		H 広域水道、a 市・b 市・c 市・g 市水道
4 家庭	a 市・b 市・c 市・d 町居住地域 等		a 市・b 市・c 市居住地域 等
5 業務	a 市・b 市・c 市・d 町商業地域 等		a 市・b 市・c 市商業地域 等
6 工業	b 市工業地域	b 市工業地域・廃水処理施設（下水道へ）	a 市・b 市・c 市工業地域
7 農業	—	B 井堰掛	B・C・D・E・F 井堰掛
8 下水道	A 流域下水道（分流式）	A 流域下水道（分流式）、B 公共下水道（合流式）	
9 流域		河川区域、農地を除いた地表面	

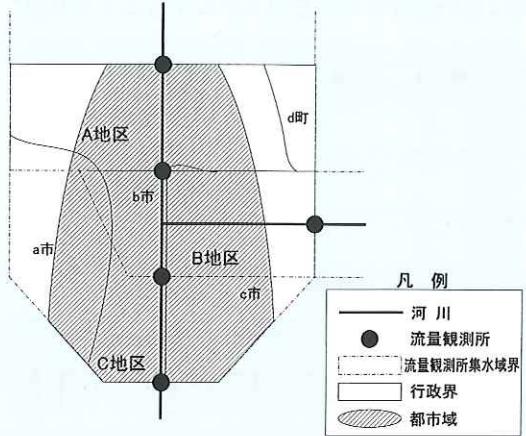


図-1 モデル領域概要

A 地区は、3 地区のうち最も上流に位置し、面積約 21.22km<sup>2</sup> 内に 3 市 1 町の一部が含まれている。河川には、市の水道取水施設及び各市町へ送水している広域水道の取水施設が存在する。

B 地区は、面積約 9.00km<sup>2</sup> で 3 市の一部が含まれ、流量観測所のある大きな支川がある。B 地区の水道取水施設は、河川以外にも地下（伏流水）からも取水している。また、b 市工業地域の廃水処理施設があり、流域下水道に接続されている。

C 地区は、最も下流に位置し、3 市の一部より構成される。面積約 11.92km<sup>2</sup> のうち、約 7 割が都市域である。河川には、4 井堰掛の取水施設と 2 井堰掛の排水施設及び地下から取水する水道施設がある。

## 2.2 水資源連関表の作成

水資源連関表は日単位で作成することとし、対象期間は灌漑期を中心とする、5月1日～11月30日の214日間とした。水の受け渡しルートの作成は、前報<sup>1)</sup>に従いGISを用いて行った。表-2に水資源連関表の作成に使用した主な流量データを示す。このうち日流量があり、そのまま使用できるものは、使用データ項目欄に※印を付けた。※印を付けた以外のものは、何らかの推定が必要であり、主要なものを以下に示す。

### 1) 上水道の給水内訳

上水道の給水量内訳は、水道統計等に記載されている年間の給水量内訳を用い、工業用水については、日変化量が少ないものとして、一定とした。また、家庭、業務及び地下への漏水量については、日取水量から工業用水量を差し引いた残りに、年間の給水量内訳比率を乗じて日単位の給水量内訳とした。

### 2) 下水処理量の流入量内訳

下水道統計には、年平均下水処理量と晴天日平均下水処理量があり、流入量の内訳比率は晴天日平均下水処理量に対し、生活(家庭、業務)、工業、その他(地下水浸入、雨水浸入等によるもの)が記載されている。ここでは年平均下水処理量と晴天日平均下水処理量の差は、地下水浸入量と雨水浸入量によるものとし、年平均下水処理量に対する内訳比率を求めた。このうち、工業の日変動は上水道と同様に一定量とした。生活からの流入量は、上水道の給水内訳比率により、家庭と業務に分離した。また、家庭と業務の日変動は、上水道の日給水量の変動パターンに併せた。その他の成分については、日平均下水処理量から家庭、業務及び工業を差し引いた残流入量に対して、無降雨日の流入量は全て地下水浸入量とし、降雨日の流入量は、図-2に示すように2日以上連続無降雨日の残流入量と地下水位との関係式(相関係数:A流域下水道0.86、B公共下水道0.87)を用いて降雨日の地下水位より地下水浸入量を算出し、残りを雨水浸入量とした。なお、A流域下水道(分流式)のうち、雨水排水については、各雨水管路網に対する排水区域界が把握できなかったこと等から、今回は分流式の雨水排水は、行われていないものとして取り扱った。このため、下水道を介して河川に流出する雨水は、今回の水循環ルートでは、地下

表-2 現状把握に使用した主な流量データ

水資源連関要素	使用データ項目	データ	出典
1 河川	※ 河川流量	日平均量	流量年表、観測資料
3 下水道	※ 取水量	日平均量	地方公共団体資料
	※ 各市町への送水量内訳(H広域水道)	日平均量	地方公共団体資料
6 工業	取水量	年平均量	地方公共団体資料
	回収水量	年平均量	地方公共団体資料
7 農業	取水量	日平均量	観測資料
	排水量	10日に1回	観測資料
8 下水道	処理量	日平均量	地方公共団体資料

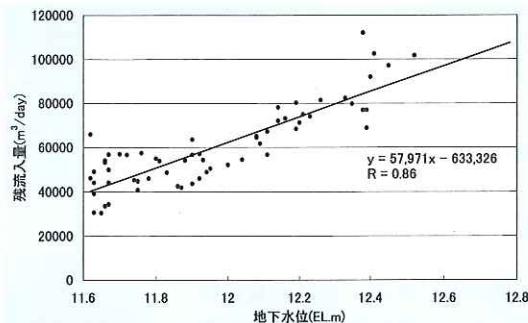


図-2 2日以上連続無降雨日の残流入量と地下水位との関係(A流域下水道)

を介して河川に流出することになる。

### 3) 各種用水及び下水処理水の地区への割り当て

上水道の給水内訳は、市町単位等で整理された日流量データであり、今回の地区分割の単位とは異なる。このため、市町データを地区毎に割り当てる必要があり、家庭と業務については地域メッシュ統計地図の人口分布をもとに算出した各地区の人口比率に従い割り当てる。また、工業については全体水量に占める割合が小さく、ここでは簡単にGISを用いて算出した工業地域面積比率により割り当てる。更に、上水道の漏水量は、各水道の給水区域面積比率により配分した。

下水処理水については、下流の領域外にある処理量データをもとに、家庭、業務については地区内の人口比率により、工業用水については工業地域面積比率により割り当てる。また、地下水浸入量については処理区域面積比率により配分した。

### 4) 農業用水の取・排水量等の算出

モデル領域において、検討対象期間中に活動している農業の井堰掛は、表-1のとおり、B～F井堰掛の5つである。このうち、最も取水量の大きいC井堰掛は日平均の取水量データと10日に1回の排水量データが観測されており、両者の相関(相関係数0.96)より日平均排水量を求めた。他の井堰掛については、他の年の同時期で、C井堰掛も含めた観測データを用い、それらのデータの

表-3 水資源連関表(対象期間平均、単位:m<sup>3</sup>/day)

流入要素	1 河川	2 地下	3 上水道	4 家庭	5 業務	6 工業	7 農業	8 下水道	9 流域	10 ため池	蒸発散	次期への もちこし*	地域外への 水量	計
1 河川		224,731	98,683			155,420					2,126	1,519,824	2,000,784	
2 地下	377,846		27,685	229	35	3,894		24,664			-451,115		-16,762	
3 上水道		6,347		43,800	6,965	816	197						76,874	134,999
4 家庭	1,196							34,462			8,371			44,029
5 業務	177							5,351			1,473			7,000
6 工業						19,868		4,024			686			24,578
7 農業	59,339	21,323									644	9,370	75,698	166,374
8 下水道													168,120	168,120
9 流域			165,101					7,903			111,847			284,852
10 ため池														0
降水	5,170							1,387			284,852			291,408
前期からのもちこし		-434,265						9,370						-424,894
地域外からの水量	1,557,057		8,631					91,715						1,657,404
計	2,000,784	-16,762	134,999	44,029	7,000	24,578	166,374	168,120	284,852	0	125,146	-441,745	1,840,516	

\*当該水資源関連要素の貯留量を示す。本表では、平均的な1日当たり貯留量を表す。

C 井堰掛取水量・排水量との相関(いずれも相関係数0.9以上)より、検討対象期間の取・排水量を求めた。

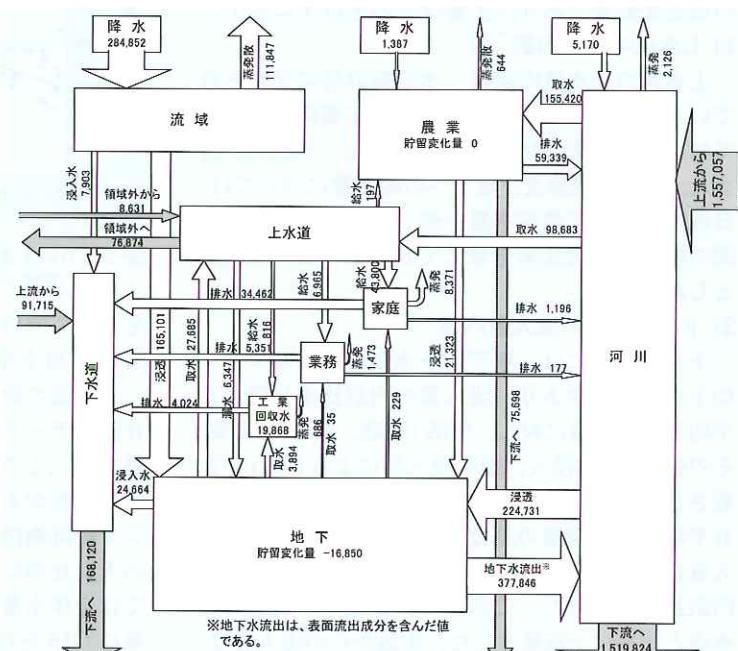
水田の貯留量・地下水浸透量の算出については、検討対象期間において、C及びD井堰掛内の幾つかの水田で水位観測が行われ、減水深が計測されており、観測点の平均値を用いて算出した。なお、蒸発散量の算出は、Hamon式を用いた。

### 5) 地下水

今回は、降雨流出モデルを用いていないため、表面流出や地下水流出等の分離を行わずに流域に降った雨は、全て地下水を経由して流出するものとして取り扱った。また、地下水は地区間を移動していると考えられるが、その定量的な把握は難しいため、今回は地区間やモデル領域外との受け渡しは無いものとして取り扱い、地下水と河川・流域との受け渡し量及び地下水の貯留量は水資源連関表から成立する連立一次方程式<sup>1)</sup>を解くことにより算出した。

なお、地下水以外の水資源関連要素間や地区間の水の受け流し量は、全て事前に観測値や何らかの推定により求めたものであるため、地下水移動の無視による影響は地下水の貯留量にしか与えないことになる。

以上のような推定方法等を用いて、水資源連関表を作成した。表-3に水資源連関表の一例として、モデル領域全体を1つの地区とし、また対象期間内の日流量データを全て平均したものと示す。図中、地下水貯留量に関する欄である、「前期

図-3 モデル領域全体としての水循環図(対象期間平均、単位:m<sup>3</sup>/day)

からのもちこし」と「次期へのもちこし」がマイナスの値になっているが、これは貯留量の実態を把握していなかったので、初期値として0を与えたためであり、実態とは異なるものの、貯留変化量を把握する上では問題ないので、マイナス値のまま、掲載している。

## 3. 水循環

### 3.1 対象期間全体を対象とした水循環

2.で作成した水資源連関表を集計し、水循環図を作成した。図-3は、表-3の水資源連関表を水循環図として表したものである。

河川からの取水は上水道と農業のみであるが、両者の取水量のうち、約6割が領域外へ直接送

水されている。また、下水道を通って下流へ流下する流量も含めると、取水量の約8割が領域外へ送水されることになる。このことにより、河川を介した領域外への流出量は流入量より減少する結果となっている。

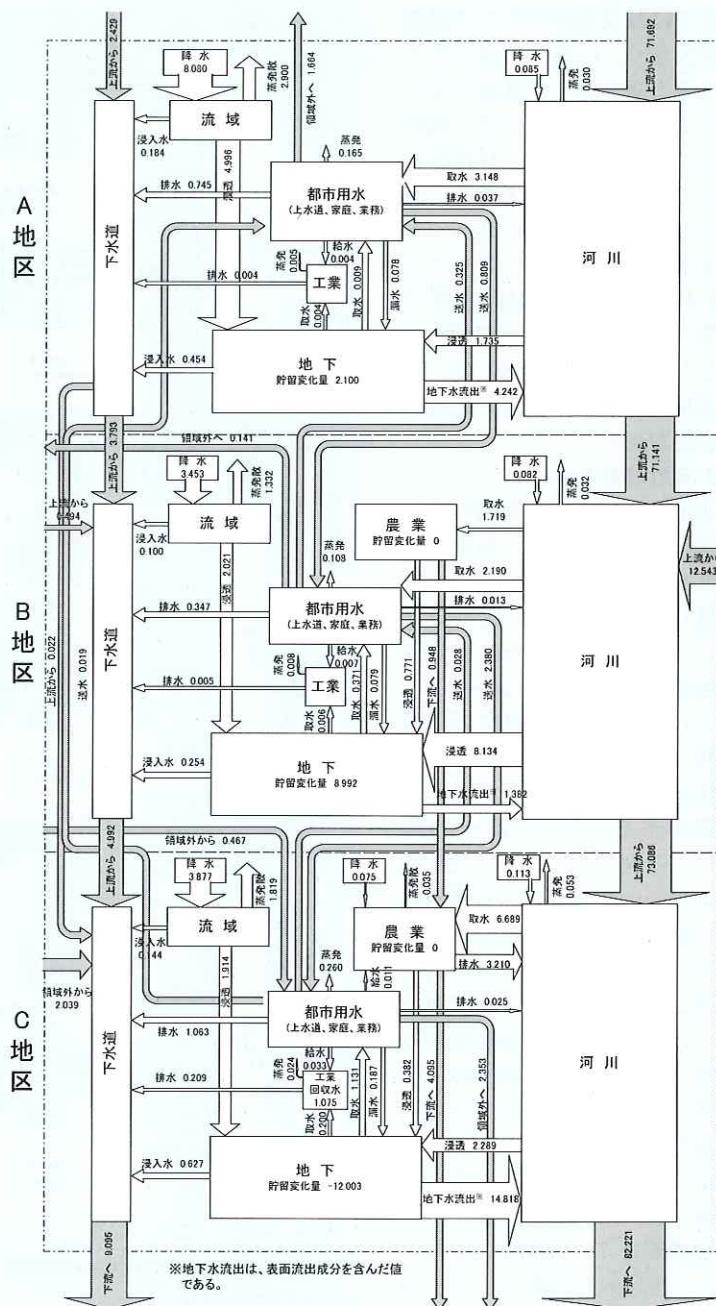
地下水の受け渡しは、地区間移動を無視し、また地下水流出中に表面流出成分を含むものである。ここで、水収支としてみると、地下の貯留量における地区間移動の無視は地区内の他の水資源関連要素間の収支を表す結果となる。また、表面流出成分については、短期間に収支が0になるものであり、ある程度の期間長を考えれば、地下の貯留量には影響を与えないものと考えることができる。このように地下の貯留量が地区内の水資源関連要素間の水収支を表すものとして図-3をみると、この領域では、河川と流域(地表面)からの浸透が地下水流入の大部分を占め、その浸透量と同程度の量が地下水流出として河川へ流れていることが分かる。また、上水道による取水や下水道への浸入の影響で地下水貯留量が減少していることが分かる。

以上より、上水道・農業の取水や下水道への浸入水等の人為系水循環が自然系の水循環の一要素である河川流量や地下水貯留量に影響を与えた結果となっていることが分かる。

次に地区間の水の受け渡し量を把握するため、地区間移動も表した水循環図を作成した。その結果を図-4に示す。紙面の都合上、上水道、家庭及び業務を

都市用水として表している。また、図中の数字は水資源関連要素の影響度合いが分かるように対象期間内の領域への全流入量(降水量+河川流量)(地下水分は除く)に対する%で表している。

図-3の説明で示した上水道と農業の河川からの



(単位: % 各数値を  $1,848,465\text{m}^3/\text{day}$  で割った値)

図-4 地区間移動を表現した水循環図 (対象期間平均)

取水位置を図-4で確認すると、上水道はA地区とB地区、農業はB地区とC地区で取水されており、また河川から取水された水は、一部上流領域外へ送水されるが大部分は、モデル領域の下流の領域外へ送水されていることが分かる。また、地

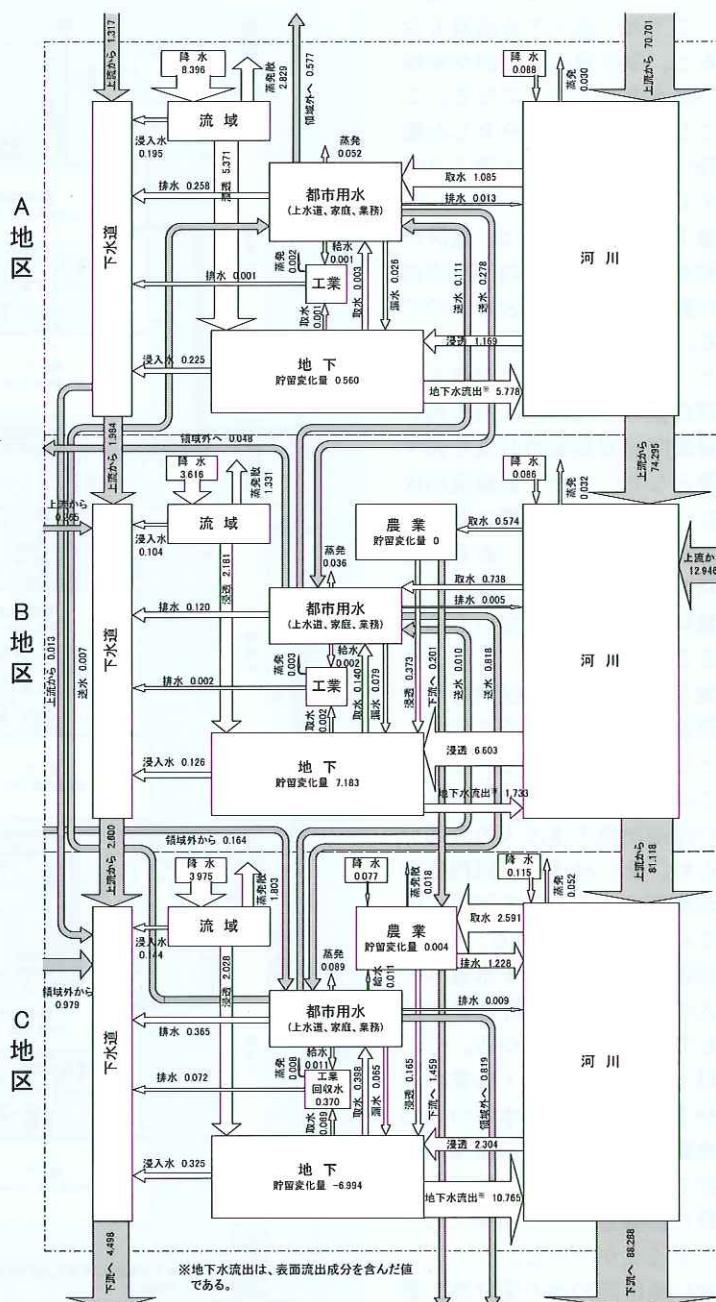
下水の収支量をみると、A、B 地区では収支量がプラスで浸透量が大きく、C 地区ではマイナスで流出量が大きい状況となっている。A、B 地区では、河川からの浸透量が大きい B 地区において特にプラスが大きく、河川への流出が大きい C 地区へと地下水流动が生じているものと思われる。今後は降雨流出モデル等、流出や地下水の挙動を表現したモデルを組み込んで、表面流出量や地下水流れを把握する必要があろう。

### 3.2 河川流量と水循環

河川流量による水循環の状況変化を把握するため、対象期間内のモデル領域に流入する河川流量 (A 地区への流入量と B 地区への流入量の合計値) を対象に超過確率 0~25%、25~50%、50~75% 及び 75~100% の流量時期に分類し、それぞれの水循環状況を調査した。例として、超過確率が 0~25% と 75~100% のものを図-5、6 に示す。図-5、6 は、図-4 と同様に、自然系の流入量である領域降水量と上流からの河川流量の合計で割合を算出し、パーセンテージで表記している。図-5 が、河川流量が大きい超過確率 0~25% のものであり、7 月~8 月の幾つかの出水の影響により生じた増水時期が全日数の半分以上を占めている。図-6 は河川流量が小さい超過確率 75~100% のものであり、無降雨日が続いた 10~11 月の減水期間が全日数の半分以上を占めている。当然のことながら、図-5 では降水による流入比率が大きいのに対して、図-6

では上流河川からの流入比率が大きくなっている。

河川流量の変化についてみてみると、図-5 の場合は、下流に行くに従って、地区内の流出や支川との合流により順次流量が増加しているのに対し、図-6 の場合は、B 地区で地下水浸透や農業・都



(単位: % 各数値を  $5,366,554 \text{m}^3/\text{day}$  で割った値)

図-5 超過確率 0~25% の水循環図

市用水からの取水により流入量の 5 割近くまで減少し、C 地区の地下水流出により回復する状況となっている。地下水の収支については、A 地区では、図-5、6 の差が小さくほとんど 0 であるのに対し、B 地区のプラスや C 地区のマイナスのペー

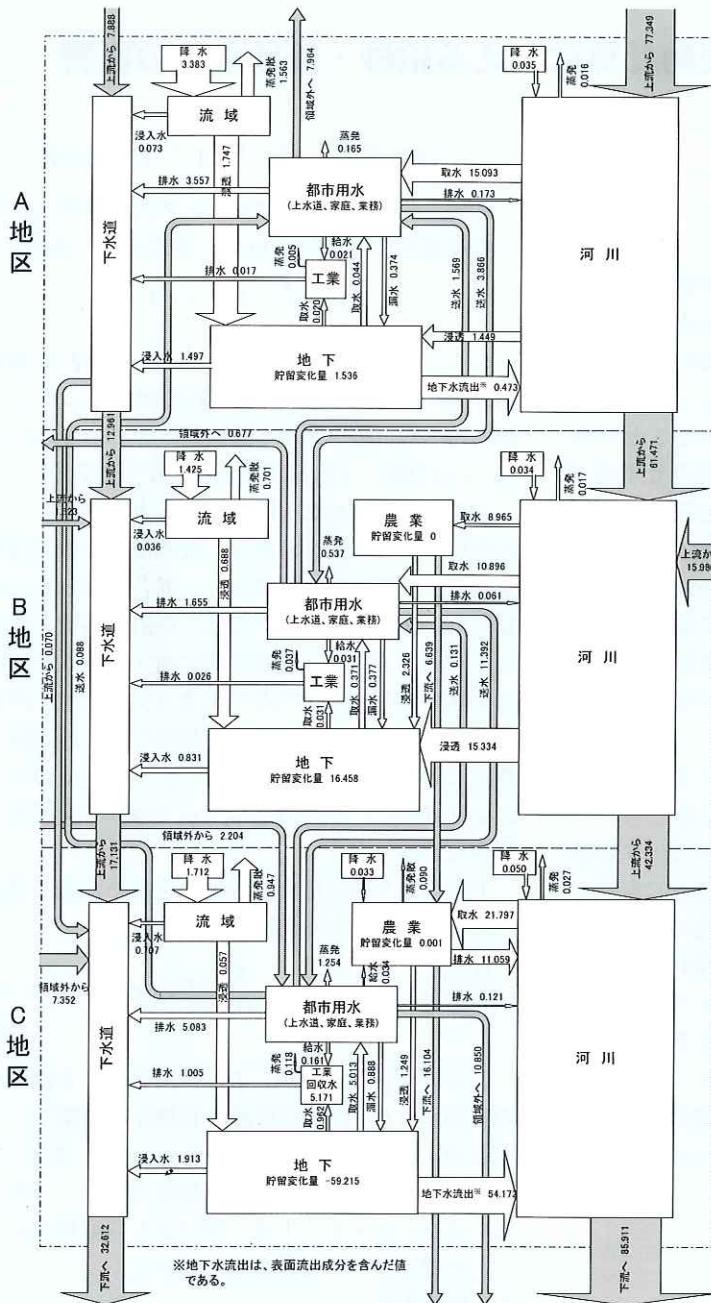
(単位: % 各数値を  $384,191\text{m}^3/\text{day}$  で割った値)

図-6 超過確率 75 ~ 100% の水循環図

センテージは、かなり大きく、河川流量が小さい場合の地下水運動の影響が大きいことが窺える。同様に農業用水や都市用水の人為系の循環成分の比率も大きくなってしまっており、水循環における人為系の占める位置が大きいこと、すなわち低水時の水

資源管理の必要水を確認することができる。

以上に示されるように水循環に及ぼす各水資源関連要素の影響は河川流量により大きく異なるものである。

#### 4. おわりに

モデル領域を対象に、水資源連関表を用いて日単位という短い時間間隔での水循環系の現状把握を行った。水資源管理の観点からは、年平均等の長期間の水循環の現状把握を実施しただけでは不十分であり、河川流量に応じた把握が必要であることを示した。

今回は、既存のデータをもとに水循環系の現状把握を行ったが、今後は、地下水の受け渡しや流出量の把握及び分流式下水道の雨水排水の把握を行い、水循環系の現状把握の精度を上げていく必要がある。そのためには、水利用量と気温や河川流量等各種影響要因との関係のモデル化や降雨流出のモデル化等を導入していく必要がある。このことは、シナリオに応じた水資源管理を行う上でも不可欠であり、今後検討する予定である。

#### 参考文献

- 1) 宮井貴大、柏井条介：水循環シミュレーションのためのデータベースの設計—水資源連関表を用いた場合—、土木技術資料、Vol.41, No.12, pp.32-37, 1999.12

宮井貴大\*

柏井条介\*\*



建設省土木研究所  
ダム部水工水資源  
研究室研究員  
Takahiro MIYAI

同 水工水資源  
研究室長  
Josuke KASHIWAI