関東平野南西域の地下水収支に関する検討

齋藤 庸^{*1}・三宅 紀治^{*2}

Groundwater Balance Study in the Southwestern Kanto Plain

Mamoru SAITO ^{*1} and Noriharu MIYAKE ^{*2}

Abstract

In the Metropolitan area, it has been pointed out that the rise of the groundwater level after the pumping restraint measured against the land subsidence has an adverse affect on many subsurface infrastructures. In order to solve those problems, it is considered to be essential to clarify the groundwater recharge and/or discharge system in the Kanto Groundwater Basin. In this context, we evaluated budget of the hydrologic cycle in the Tama River Basin and it's neighboring several small river basins locating at the Southwestern Kanto Plain. In the study, we utilized the spatial analysis capability of GIS to handle the large amount of the hydrological data. As a result, it was confirmed that considerable amount of groundwater is flowing out continuously from the Tama River Basin to the neighboring several small river basins and/or subsurface aquifers. In this paper, we will demonstrate that the water budget study is sufficiently effective to bring out the groundwater flow system over a large area such as the whole Kanto Plain.

Key words: Alluvial plain of the Metropolitan area, Rise of the groundwater level, Groundwater flow system, Water balance study, GIS

キーワード：首都圏沖積低地，地下水位上昇，地下水流動系，水収支解析，GIS

I. はじめに

首都圏沖積低地では地盤沈下対策として採られた揚水規制の結果，被圧地下水の大幅な上昇を招くこととなり，地下構造物に様々な影響を与えている（遠藤，1998；石井，安原，2000）。被圧地下水頭は今後もさらに上昇することが予想されており（三宅，2000），重大な問題が顕在化する前に基本的な対策を講ずる必要がある。

首都圏沖積低地地域は地下水流動系の流出域にあり（石井他，1975；遠藤他，1981），こうした問題へ対処するためには関東平野規模の広域地下水盆地全体の地下水涵養・流動機構の解明が必要と考えられる。関東平野規模の広域地下水盆地の地下水

流動研究においても，地下水ポテンシャルや環境同位体調査といった流動の指標となる要素の調査が有効である（嶋田，2000）が，地下水流動系の空間構造は気候，土壌，地形，地質等の制約を受けていて（樫根，2000），そうした指標自体局所的な水文現象の影響を受けやすいため，それらに基づく研究成果は定性的な判断にとどまることも多いと考えられる。

筆者らは，地下水流動の指標となる要素の調査とともに水収支解析も広域地下水流動研究には重要であり，かつ地下水流動系の大要把握には，該当する地表水・地下水流域の月別あるいは年別概略水収支評価でも十分効果的と考えて，これまでいくつかの流域を対象にした検討を行ってき

* 1 日本工営株式会社 Nippon Koei Co., Ltd.

* 2 清水建設株式会社 Shimizu Corporation

た。その成果の一部は齋藤他（2000，2001，2002）などとして公表したが、いずれの場合にも、概略水収支評価が地下水ポテンシャルなどによる調査結果の補強・検証に有効であり、また地下水流動系の定量化にも寄与することを証明できたものとする。

研究対象地域に関連した類似の水文研究事例としては、土屋・和泉（1991）、土屋（1997）及び雨水貯留浸透技術協会（2000）などがある。タンクモデルなどのシミュレーションモデルを用いた詳細な検討であり、河川流出や雨水の浸透・涵養の定量化精度は優れるが、比較的小きな単一流域を扱ったものであり、特に深層部地下水との関係を含めた広域地下水流動の議論には適用の限界が考えられる。本研究は、上記した既往研究事例と比べると流域も大きくかつ隣接流域との地下水往来の可能性を含めて議論した点で既往の研究手法とは異なっている。本研究は、上記した広域地下水流動研究における既往研究手法上の課題の解決を目指すとともに、関東平野規模の広域場を対象にした地下水収支評価手法の確立を目指している。

一方、関東平野規模の広域地下水流動系を対象にした水収支評価では、地形・土地利用、気象・

水文や地下水揚水量データ等の多様で大量の空間情報の効率的かつ正確な処理が要求される。従来の紙地図に基づいた手作業による情報処理には自ずと限界があり、これが地下水調査手法の中で関東平野規模の広域場を対象にした概略水収支評価が慣例化しない大きな要因の1つになってきたと考えられる。これに関して筆者らは、IT技術の1つとして近年様々な分野で利用されている地理情報システム（GIS）を活用し、大量の空間情報の管理と水収支評価への支援解析を試みた。

本稿では、多摩川流域を中心とする関東平野南西域を対象にして、水収支要素データの実態、GISを用いた水収支要素空間解析の方法と結果、それら水収支データから求まる年別水収支、水収支から推定できる当該域地下水の涵養・流動・流出機構について論ずる。

II. 調査地域

1. 地形地質概要

1-1 地形・土地利用

多摩川流域とその近傍武蔵野台地の地形は、Fig. 1 に示すように、山地・丘陵地・台地・低地

Fig. 1 Topography of the study area (after Omori *et al.*, 1986)

に区分され、大局的に西から東に向かって階段状に配列している。このような地形の違いはその形成時期の差異によるもので、地形毎に構成地質が異なっている。山地は先第三系の基盤岩で構成され、広域地下水流動に係る帯水層が分布する地域は主に丘陵地・台地及び低地である。

水収支検討流域（詳細はⅢ、2-1 項参照）に関する地形特性を整理して Table 1 に示す。青梅市にある多摩川調布橋流域はそのほぼ全体が標高 200 m 以上の山地域にあり、その下流調布市の多摩川石原観測所流域はその約 7 割が山地域にある。また武蔵野台地上の検討対象流域の平均標高は数十 m 程度である。

国土数値情報の土地利用メッシュ（次項参照）に基づいて整理した各流域内の土地利用変化の状況を Fig. 2 に示す。宅地・道路などを含む建物用地に着目すると、1997 年以前の過去 10 年間極端に大きな変化はなく微増の状況であるが、20 年ほど前と比べると変化が多少目立つ流域もいくつかある。多摩川流域の場合、上流山地域のほとんどが森林である。武蔵野台地上の検討対象流域の場合、建物用地は 50%～95%と変化する。また、田・畑もそれぞれ 5～20%占める。

1-2 GIS 空間解析機能の利用

GIS の空間解析機能としては、単一領域毎の面積計算、複数領域の面積クロス集計、領域内に属

Table 1 Topographic features of the study basins

River Basin	C.A.* ¹ (km ²)	Altitude (TP+m)		Average Altitude* ² (TP+m)		
		Lowest	Highest	Whole basin	Mt. Land* ³	Other area
Tama R. (Chofu Br.)	433	149	2071	1023 (100)	1027 (99.5)	183 (0.5)
Tama R. (Ishihara G.S.)	1040	29	2071	616 (100)	839 (69)	119 (31)
Nariki R. (Ryogun Br.)	50	109	829	274 (100)	324 (68.4)	166 (31.6)
Kasumi R. (Kaneko Br.)	8	151	300	189 (100)	221 (27.5)	177 (72.5)
Yanase R. (Seiryu Br.)	89	17	191	84 (100)	0 (0)	84 (100)
Ochiai R. (Jinpou Br.)	15	39	79	59 (100)	0 (0)	59 (100)
Shakujii R. (Toyoishi Br.)	49	3	83	41 (100)	0 (0)	41 (100)
Kanda R. (Ikkyu Br.)	72	14	63	43 (100)	0 (0)	43 (100)
Tsurumi R.	235	0	165	43 (100)	0 (0)	43 (100)
Furou R.	55.8	12	190	84 (100)	0 (0)	84 (100)
Zenpukuji R.	18.3	29	63	49 (100)	0 (0)	49 (100)
Ebi R. (Yasakae Br.)	8.3	0	35	20 (100)	0 (0)	20 (100)

Remarks: *¹: C.A.; Catchment Area, *²: Figures in parentheses show the areal ratio,

*³: Mt. Land; Mountainous Land (Area with the altitude more than 200 m)

Figures in this table were compiled applying the GIS functions based on the Kokudo Suuti Joho rendered by the Japanese Government.

Fig. 2 Long-term change of the land-use components

す点情報の集計，高さ情報を持つ点データによる等高線作図などがある。本研究では，上記した流域毎の地形特性分析（平均標高算定）と土地利用集計の他，後述の流域毎の行政面積比計算（流域毎揚水量の集計に利用）やティーセンポリゴン面積比計算などにこの機能を活用した。なお，GISに利用できる数値データとしては，数値地図類が国土地理院から提供されており，また土地利用メッシュデータを含む国土数値情報は国土交通省のホームページ経由でダウンロード可能である。

1-3 地質概要

大森他（1986）によると，丘陵地には鮮新世～更新世の上総層群（下位の北多摩層と上位の東久留米層に細分される），台地は上総層群や更新世下総層群を基盤として更新世関東ローム層もしくは段丘礫層，低地には沖積層の分布がある。これら各層の中で良好な帯水層と考えられているのは，東久留米層より上位の地層である。北多摩層は固結したシルトを主体とし低透水性基盤と見なすことができる。

2. 水理地質構造

地下水は，その容れ物である地質と密接な関係があり，帯水層になる地層の堆積相並びに地質構造に影響を受けて流動していると考えられる。Fig.1に示したように，研究対象地域内には，武蔵野台地西部（狭山丘陵西縁部）を通り立川市街地南東方にのびる立川断層がある（遠藤，石井，1984）。関東平野西南域の被圧地下水は，大局的には西から東に向かって流動しており，立川断層が地下水の流れに障害となっていることが確認されている（Kayane *et al.*, 1993；Taniguchi *et al.*, 1999）。

Ⅲ. 水収支要素データとその補完・補正

1. 気象データ

1-1 降水量

気象庁による多摩川流域内及びその隣接地におけるアメダス降水量観測所は現在19ヶ所ある（Fig. 3）。なお本研究では，特に高標高山地部の降水量を吟味する目的で，東京都水道局小河内貯水池管理事務所による小河内ダム（Fig. 1参照）

Fig. 3 Location map of the meteorological gauging station

上流の観測所3地点（Fig. 3 参照）の降水量データも補足的に収集整理した。代表的気象観測所（山地域は「小河内」、丘陵地が「八王子」、低標高地域は「練馬」を選択）の年間降水量は、いずれも 1,000 mm/y 前後～2,500 mm/y 弱で変化し（Fig. 4）、標高が下がるほど降水量が減少する傾向はあるが顕著ではない。Fig. 5 は、多摩川流域

内の気象庁観測所データに小河内ダム上流の観測所データを加えて、観測所標高と 1998 年までの過去 10 年間の平均年間降水量との関係を整理したものである。標高と降水量とは正の相関があり高度とともに降水量が増加するのが一般的と考えられるが、Fig. 5 でみる限り、多摩川上流の山地域ではこうした関係が明瞭ではない。

Fig. 4 Long-term change of the observed value at the representative meteorological gauging station

Fig. 5 Relationship between the altitude and the meteorological data

1-2 気温

現在のアメダス気温観測所は10ヶ所ある (Fig. 3)。これらの観測所の年平均気温は、山地域で12～13℃、丘陵地で14℃程度、低標高域で15℃程度となり、標高が下がるほど気温が上昇する傾向が顕著である。特に低標高域ほど経年的な平均気温の上昇トレンドがあり、首都圏のヒートアイランド化を示している。

1-3 蒸発散量

可能蒸発散量は気温をパラメータとしてソーンスウェイト法 (山本, 1983) で算定した。山地域で700 mm/y 前後、丘陵地で770 mm/y 程度、低標高域で800 mm/y 弱となり (Fig. 4)、標高が下がるほど気温が上昇するため蒸発散量も増加する。Fig. 5には観測所標高と10年間平均可能蒸発散量の関係も示したが、これによると多摩川上流山地部の場合、流域内山地域の平均標高800～1000 m程度に対し可能蒸発散量は約600 mm/y 程度となり、平均標高が数十 mの武蔵野台地では800 mm/y 程度になることが分かる。

一方、実際の水収支計算に用いる実蒸発散量のうち、丘陵・台地部からの蒸発散量については、既往の検討成果 (雨水貯留浸透技術協会, 2000; リバーフロント整備センター, 2000) を参考にし

て決定した。この検討で用いている流出解析モデルは、建物・道路などの不浸透域を考慮し、水収支要素としては自然の循環要素とともに人為的な水の流入をひととおり組み込んだモデルであり、都市化の進む中小河川流域に関して精度の高い水収支評価が可能と考えられる。これらの検討によれば、都市域における実蒸発散量は可能蒸発散量 (800 mm/y) の6割前後 (500 mm/y 程度) である (後出 Table 3 参照)。また、山地域に関しては諸説あるが可能蒸発散量の7～8割程度とし、流域内山地域平均標高の可能蒸発散量 (600 mm/y) を考えあわせると丘陵・台地部と同程度の蒸発散量 (500 mm/y 程度) が推定できる。利用できる気象観測点データが比較的低標高部のものが多いこと、長期的にも土地利用区分は大きく変化していないこと (Fig. 2) などの理由からここでは、全流域、全期間を通して実蒸発散量は可能蒸発散量の6割として計算した。なお、Table 3の水収支計算結果をみると、青梅市の多摩川調布橋流域の長期平均実蒸発散量は420 mm/y 程度であり、想定できる可能蒸発散量の7割と小さめであるが許容範囲にあるとみなした。

1-4 面積降水量, 面積蒸発散量

流域毎の水収支検討に用いる面積降水量と面積

蒸発散量の算定にはティーセン法を採用した。GISの空間解析機能を活用した降水量のティーセン分割状況を既出のFig. 3に示した。

1-5 降水量の補正

上記した手順で準備した流域面積降水量、面積蒸発散量と、後述する河川流出量及び流域内地下水利用量を用い、さらに人為的な水の流出入量も考慮の上で、山地内観測所の多摩川調布橋流域（後出Fig. 6参照）の地下水収支を算定すると平均320 mm/yの赤字（流出過多）になることが判明した（Table 2）。データを吟味してみると降水量と河川流量が同等程度であることが分かる。この理由としては、①降水量が過小である、②河川流量が過大である、③降水量・河川流量は正しく赤字の原因として他流域から大規模な地下水流入がある、の3つが想定できる。ほぼ全域に低透水性基盤が分布する青梅市調布橋流域では、③の他流

域からの地下水流入は考え難いことから、①か②の理由を考えざるを得ない。ここでは、先のⅢ、1-1で述べたように、特に高標高山地域の降雨量が一般的な傾向と比べ特異であるとの理由から、①山地内降水量観測値が実際より過小であることを、調布橋流域の水収支に不均衡が生じている原因と見なすこととした。

このため実際の水収支計算では、多摩川調布橋流域の地下水収支がゼロになるように、調布橋流域に係る山地全域観測所の降水量観測値の補正を行った（補正係数の平均は約1.2、Table 2）。

2. 河川流量

2-1 流量観測所

多摩川流域内とその隣接流域における流量観測としては、国土交通省による連続観測（日本河川協会、1976～2001）と東京都の月1回定期観測

Table 2 Correction coefficient of the precipitation in the mountainous land

Year	Annual Precipitation (mm/y)	Actual Evapo- Transpiration (mm/y)	Observed Runoff at Chofu Bridge (mm/y)	Pumping Amount within the basin (mm/y)	Water Balance (mm/y)	Proper Annual Precipitation (mm/y)	Correction Coefficient
1,979	1,462	429	928	0.5	104	1,357	0.93
1,980	1,122	430	953	0.5	-262	1,384	1.23
1,981	1,453	410	1,241	0.5	-198	1,651	1.14
1,982	1,885	408	1,712	0.6	-235	2,121	1.12
1,983	1,726	415	1,898	0.6	-587	2,313	1.34
1,984	928	415	800	0.7	-288	1,216	1.31
1,985	1,476	409	1,403	1.1	-338	1,814	1.23
1,986	1,337	422	1,126	0.7	-212	1,550	1.16
1,987	1,016	409	840	0.8	-234	1,250	1.23
1,988	1,635	434	1,754	0.8	-554	2,189	1.34
1,989	1,969	408	1,880	0.7	-319	2,288	1.16
1,990	1,670	420	1,533	0.8	-283	1,953	1.17
1,991	2,177	444	2,212	0.8	-479	2,657	1.22
1,992	1,416	433	1,506	0.7	-524	1,940	1.37
1,993	1,528	419	1,597	0.7	-489	2,018	1.32
1,994	1,353	407	1,251	0.7	-306	1,659	1.23
1,995	1,143	446	1,152	0.6	-456	1,599	1.40
1,996	1,102	427	888	0.7	-213	1,315	1.19
1,997	1,096	416	756	0.8	-77	1,173	1.07
1,998	2,205	433	2,248	0.7	-477	2,682	1.22
1,999	1,708	444	1,567	0.7	-304	2,012	1.18
'79-'99 Mean	1,496	423	1,393	0.7	-321	1,816	1.22

*60% of the potential evapo-transpiration estimated by the Thornthwaite Method.

(東京都環境保全局, 1974 ~ 2000) がある。流域別水収支は、流量観測精度や観測点位置を勘案し、多摩川本川では青梅市上長瀬の調布橋及び調布市下石原の石原観測所（ともに国交省観測所）、入間川上流成木川両郡橋、霞川金子橋、武蔵野地上柳瀬川清柳橋、落合川神宝大橋、石神井川豊石橋及び神田川一休橋（以上東京都観測所）の、計8流域 (Fig. 6) を対象に行うこととした。

2-2 多摩川本川流量

多摩川本川流量データの取り扱いに際しては、大量の取水・排水の補正が必要になる。

石原観測所における河川流量観測値と、河川管理者の国土交通省に届け出された流域内取水量・排水量（地下水技術協会, 2001）から求めた、取水・排水が無い場合の実質河川流量（＝観測河川流量＋流域内取水量－流域内排水量）を Fig. 7 に示す。取水量は1979年当時からさほど変化しないが当時の排水量は少なかったため観測河川流量と実質河川流量との乖離が大きかったが、最近の1998年は取水量と排水量が拮抗して観測河川流量そのものが実質河川流量に近い状況である。多摩川の年間平均実質流量は20～60 m³/sと年々で

Fig. 6 Location map of the runoff gauging station for the studied river basins

Fig. 7 Long-term change of the intake, the drainage and the observed/corrected runoff at the Ishihara gauging station of the Tama river

大きく変化している状況である。

なお、この河川流量の中にはさらに、人為的な水の流出入としての上水道漏水や下水道未普及地区からの下水排水量が含まれると考えられる。この推計結果は本章第4項で詳述するが、多摩川石原地点までの間に $4 \text{ m}^3/\text{s}$ 弱 (1979) $\sim 1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ (1999) の流出がみこまれる結果である。実際の水収支解析ではこうした人為的な水の流出を考慮して補正した河川流量を用いた。

2-3 入間川上流及び武蔵野台地上小流域流量

(1) タンクモデルによる流量時系列発生

入間川上流及び武蔵野台地上小流域の流量は月1回の観測であるため、観測結果だけから水収支を検討するのは精度的に限界がある。水収支定量化精度の向上のためここでは、タンクモデル法(菅原, 1972)を用いて流量時系列の発生(実測値の補完)を試みた。構築したモデルは Fig. 8 に示す1列3段構造のタンクモデルであり、これにより表面流出、中間流出、基底流出から成る河川流量を表現した。

(2) 発生流量時系列の検定目標

流量観測は無降雨時(あるいは小降雨時)に実施するのが普通であり、そうした気象条件下の月1回の実測流量データは、ほとんどが基底流出量に相当すると考えられる。このことは、表面流出と中間流出を含んだ観測データが少ないため、モデルの再現性が担保できない懸念があることを示している。これについては、近傍流域を対象にした既往の流出解析結果(雨水貯留浸透技術協会, 2000; リバーフロント整備センター, 2000)を調べ(Table 3), その中から地形・地質と流域面積の近似する不老川流域(Fig. 6 参照)の流出特性に着目して流量時系列の発生を行った。検定目標は、不老川流域相当の表面及び中間流出比率並びに河川流量実測値の再現の2項目となる。なお、実測流量には、多摩川流量と同様に、上水道漏水並びに下水道未普及地区からの下水排水量を含むと考えてそれを補正して計算に用いた。

入間川上流及び武蔵野台地上小流域の実測流量は、流域内の降水量と蒸発散量から算出した基底流出量から大きくかけ離れることが多い。またこの状況は、流量を上水道漏水量などで補正しても

* Offset value of the base flow for the each small river basin is - 0.8 m^3/s for the Nariki R., - 0.1 m^3/s for the Kasumi R., - 0.7 m^3/s for the Yanase R., 0.5 m^3/s for the Ochiai R., 0.1 m^3/s for the Shakujii R., and 1.0 m^3/s for the Kanda R.; It is considered to be that the positive figures show the G/W inflow and the negative ones correspond to the G/W outflow. No offset is adapted for the Tama River.

Fig. 8 Basic structure and the calibrated parameters of the tank model

変わらない場合が多い。このため、流域毎に Fig.8 の脚注に示す一定流量を加減することで補正した。この補正量は、流域の基底流出量と地下水涵養量の差分の長期平均を表している。河川の基底流出に係る帯水層中からの地下水の汲み上げがないと仮定すれば、プラスの補正量は他流域（もしくは深部帯水層）からの地下水流入、マイナスの補正量は他流域（もしくは深部帯水層）への地下水流出を表すと考えることができる。

(3) 流量時系列の推定結果

結果の 1 例として Fig.9 に落合川神宝大橋の流量時系列を示す。タンクモデル同定過程や観測精度などに課題は残るが、基底流出量の概略規模は把握できる結果となっていることがわかる。なお、タンクモデル検討上の課題に関しては、IV, 3. 考察でまとめて述べる。

図にはタンクモデルによる多摩川石原地点の流量再現状況も示したが、この計算は、多摩川本川流量の成分分離のために実施したものである。武蔵野台地小流域と異なりこれは、連続観測データを再現対象にして通常の方法で検定を行った結果である。なお、検討対象 8 流域のタンクモデル定

数（検定結果）は Fig.8 に示したとおりである。

3. 地下水利用量

3-1 地下水利用量データ

農業用を除く地下水利用量が都県毎に集計され、公表されている（埼玉県，1975～2000；東京都環境保全局，1972～1999；神奈川県，1969～1999）。最近の都県毎の全体利用量は、埼玉県で 80 万 m^3/d ，東京都 60 万 m^3/d ，神奈川県が 25 万 m^3/d 強である（Fig.10）。最近 10 年間では各地域とも利用量総量は微減を示す。

3-2 流域内地下水利用量

流域内地下水利用量は、GIS の空間解析機能を利用し、流域内に占める各行政区域の面積比率に当該行政区域内の地下水利用量（例えば Fig.11）を乗じ、それを流域内全体で集計する手順で算定した。

4. 上水道漏水量と下水道未普及地区からの下水排水量

4-1 水道給水量、漏水量及び下水道普及率データ

石井・安原（2000）は、上水道漏水による地下水収支への影響が小さくないことを指摘した。こ

Fig. 9 Long-term observed/calculated runoff hydrograph at the representative gauging station

Fig. 10 Long-term change of the groundwater usage in the study area

Fig. 11 Distribution of the groundwater usage in the study area (Year of 1980)

れに加えて流域内水収支要素には下水道未普及地区からの下水排水量を考慮する必要があると考えられることから、これらに関するデータを収集し整理した。

水道給水量、漏水量及び下水道普及率等のデータについても都県毎に集計され公表されている(埼玉県, 1979～2000; 東京都, 1978～1999)。東京都の場合、上水道漏水量は全給水量における全漏水量の形で公表されている。したがって行政区域毎の上水道漏水量は、行政区域毎の全給水量に全体の漏水率を乗じて推計することになる。埼玉県の場合は、行政区域毎の無効水量が公開されている

のでこの量をそのまま漏水量とした。また、下水道排水量は、東京都、埼玉県ともに、行政区域毎の下水道普及率が公開されているのでこれから行政区域毎の下水道未普及率をもとめ、これに行政区域毎の全給水量を乗じて推計した。

Fig. 12 によれば、上水道漏水率は、東京都、埼玉県ともに、十数% (1979)～10%未満 (1999)である。下水道普及率は、東京都(市部)の場合は40%弱 (1979)～90%強 (1999)、埼玉県は20%強 (1979)～70%弱 (1999)である。

4-2 流域内上水道漏水量と下水排水量

流域内上水道漏水量と下水排水量に関しても、

Fig. 12 Long-term change of the water and sewerage index

GISの空間解析機能を利用し、流域内に占める各行政域の面積比率に当該行政域内の上水道漏水量と下水排水量を乗じ、それを流域毎に集計する手順で算定した。集計結果をFig. 13に示す。

なお、下水道未普及地区の下水排水と異なり上水道漏水量の場合は、その全てが当該流域内の河川に流出しているかどうかは不明であるが、水道漏水は一般に地下浅所で生じかなり早い時間で河川に流出しやすい状況にあると想定し、上水道漏水量全量が河川に流出することとした。

IV. 水収支解析の結果と考察

1. 水収支解析手法

1-1 流入成分と流出成分

水収支にかかわる流入成分の主たるものは降水であるが、この他に地下水に関連する流入成分として他流域からの地下水流入があり、さらに流域

内の上水道漏水、下水道未普及地区からの下水排水の流入なども考えられる。他流域からの地下水流入は水収支計算の結果として評価する項目であるが、前記したように上水道漏水と下水排水に関しては、ここでは全量が河川に流出すると想定した。

一方流出成分としては、蒸発散、河川流出、地下水利用、並びに他流域への地下水流出が考えられる。このうち他流域への地下水流出は、水収支計算の結果で評価する項目とした。なお、河川流出はさらに表面流出、中間流出、基底流出に細分できる。

1-2 水収支算定式

以上の水収支要素を用いて流域の地下水収支は次式により算定できる (Fig. 14 参照)。

$$\begin{aligned} \text{地下水涵養量} &= \text{降水量} - \text{蒸発散量} - \text{表面流出量} \\ &\quad - \text{中間流出量} \\ \text{地下水収支} &= \text{地下水涵養量} - \text{地下水利用量} - \text{基底流出量} \end{aligned}$$

Fig. 13 Long-term change of the waterworks leakages and direct sewerage discharge

ここで、地下水収支が負の場合は、収支がゼロになる量（すなわち地下水収支の絶対値に見合う量）の地下水流入があると考ええる。また、地下水収支が正の場合は、その量が他の流域へ地下水流出していると考えることができる。

2. 水収支解析結果

1979年～1999年の21年間の、各流域水収支の

平均を Table 3 に、多摩川石原地点流域並びに武蔵野台地上 4 流域合計の水収支図を Fig. 14 に示す。また各流域の地下水収支経年変化を Fig. 15 に示す。青梅市多摩川調布橋流域はそのほぼ全域が山地にあることから地下水収支はバランスすると仮定したのは前記したとおりである。その他 7 流域の地下水収支について以下に考察する。

Table 3 Result of the water balance study

River Basin			C.A. km ²	Study Period	P ^{*1} mm/y (a)	Ea ^{*1} mm/y (b)	R ^{*1, *2} (mm/y)				Recharge ^{*1} (g) = (a) - (b) - (d) - (e)	Qp ^{*1} (h)	GW Inflow/ ^{*3} Outflow (g) - (f) - (h)	Geology ^{*4}		
							Total (c)	Surface flow (d)	Inter- flow (e)	Base flow (f)						
Present Study	Tama River	Chofu Br. ^{*5} (Oume City)	433	79-99 ^{*6} (Mean)	1,758	423	1,335	495	246	594	594	1	0	Pt		
					100%	24%	76%	28%	14%	34%	34%	0%	0.0			
		Ishihara G.S. ^{*5}	1040	do.	1,440	423	1,335	495	246	594	276	1	-318			
					100%	29%	93%	34%	17%	41%	19%	0%	-4.4			
	Upstream of the Iruma R.	Nariki R. ^{*5} (Ryogun Br.)	50	79-99 ^{*6} (Mean)	1,734	438	921	336	171	414	790	102	274	KL, Tr, Kz		
					100%	25%	53%	19%	10%	24%	46%	6%	9.0			
		Kasumi R. (Kaneko Br.)	8	do.	1,517	438	921	336	171	414	572	102	57			
					100%	29%	61%	22%	11%	27%	38%	7%	1.9			
	Musashino Plateau	Yanase R. (Seiryu Br.)	89	79-99 (Mean)	1,658	450	721	336	195	190	678	8	480	Kz, Pt		
					100%	27%	43%	20%	12%	11%	41%	0%	0.8			
		Ochiai R. (Jinpou Br.)	15	do.	1,496	450	721	336	195	190	515	8	317			
					100%	30%	48%	22%	13%	13%	34%	1%	0.5			
	Previous Study	Tama River	Kasumi R. (Kaneko Br.)	8	do.	1,797	451	960	403	216	342	727	10	376	KL (Kz)	
						100%	25%	53%	22%	12%	19%	40%	1%	0.1		
			Yanase R. (Seiryu Br.)	89	79-99 (Mean)	1,481	451	960	403	216	342	412	10	60		
						100%	30%	65%	27%	15%	23%	28%	1%	0.0		
Ochiai R. (Jinpou Br.)			15	do.	1,418	463	720	251	158	311	546	132	103	KL		
					100%	33%	51%	18%	11%	22%	38%	9%	0.3			
Musashino Plateau	Shakujii R. (Toyoishi Br.)	49	do.	1,472	477	2,061	263	166	1,633	567	325	-1391	KL			
				100%	32%	140%	18%	11%	111%	39%	22%	-0.7				
	Kanda R. (Ikkyu Br.)	72	do.	1,499	489	1,085	261	169	656	580	99	-175	KL			
				100%	33%	72%	17%	11%	44%	39%	7%	-0.3				
Previous Study	Sum of the above 4 basins	225	do.	1,510	491	1,468	265	171	1,033	584	206	-655	KL			
				100%	33%	97%	18%	11%	68%	39%	14%	-1.5				
	Tsurumi R. ^{*7}	235	1996	1,469	478	1,130	259	165	706	566	162	-303	KL			
				100%	33%	77%	18%	11%	48%	39%	11%	-2.2				
Furou R. ^{*8}				55.8	1993	1,473	439	986	682	80	224	224		-	-	KL (Kz)
						100%	30%	67%	46%	5%	15%	15%		-	-	
Previous Study	Zenpukuji R. ^{*8}	18.3	1991	1,427	512	913	210	152	551	551	-	-	KL			
				100%	36%	64%	15%	11%	39%	39%	-	-				
	Ebi R. ^{*8} (Yasakae Br.)	8.3	1993	2,015	382	1,630	1,130	28	472	472	-	-	KL			
				100%	19%	81%	56%	1%	23%	23%	-	-				
Previous Study	Ebi R. ^{*8} (Yasakae Br.)	8.3	1993	1,487	485	1,123	320	600	203	203	-	-	KL, Sm			
				100%	33%	76%	22%	40%	14%	14%	-	-				

*1: P; Annual Mean Precipitation, Ea; Annual Mean Actual Evapo-Transpiration, R; Annual Mean Runoff, Qp; Annual Mean Pumping Rate (Upper stand figures show annual values and lower stand figures show per cent out of P)

*2: Total runoff of the river basins for the Tama River is the observed runoff value, although the ratio of the components; i.e. the surfac flow, the interflow and the base flow, is derived from the Tank Model Simulation results. On the other hand, the total runoff and its components of the river basins at the Upstream of the Iruma River and on the Musashino Plateau are the calculated values by the Tank Model Simulation.

*3: Unit of the upper stand figures is mm/y and that of the lower stand shows m³/s.

*4: Pt; Paleozoic - Mesozoic Layer, KL; Kanto Loam, Tr; Terrace Deposits (Gravel), Kz; Kazusa Formation, Sm; Shimousa Formation

*5: The water balance on the upper stand is the values estimated on the basis of the corrected rainfall, while the lower stand is of the original.

*6: Years with lack of the water balance component data are excluded from the mean value calculation.

*7: Foundation for Riverfront Improvement and Restoration (2000)

*8: Association for Rainwater Storage and Infiltration Technology (2000)

Fig. 14 Water balance in the hydrologic cycle of the representative river basins

Fig. 15 Long-term change of the groundwater budget of the individual river basins

3. 考察

3-1 多摩川石原地点流域

通年平均で 274 mm/y (9.0 m³/s) の地下水収支黒字 (すなわち地下水流出) が見込まれる (Fig. 14)。これを時系列 (Fig. 15) で見ると、1982 年以降の地下水収支は数 m³/s 以上の黒字 (地下水流出) が継続する状況にある。

これらの計算結果は、青梅市調布橋から調布市石原地点間の多摩川流域から隣接他流域へ数 m³/s 規模の地下水流出が続いていることを示している。隣接流域の中で鶴見川流域へは水理地質構造上から地下水の流出は考え難いため、そのほとんどは北東部新河岸川支川流域や都内武蔵野台地上の中小河川流域あるいは首都圏沖積低地下の

帯水層中へ流出しているものと予想できる。

上記の水収支検討結果の妥当性は地下水ポテンシャルなどにより検証する必要があるが、Kayane 他 (1993) や Taniguchi 他 (1999) による断面ポテンシャルによれば多摩川流域から深部帯水層に向かう地下水流動の存在は明らかであり、水収支解析結果の他流域への地下水流出量の多くは深部帯水層に向かうものと考えられる。一方、1993～2001年間の測定結果から作成された不圧地下水の地下水面等高線図 (Fig. 16; 地下水技術協会, 2001 を参考に作成) によれば地下水面形状が多摩川流域から狭山丘陵南方の台地を経由して武蔵野台地に向かう形状になっており、不圧地下水の他流域への流出を示唆している。したがって、多摩川流域から他流域に流出する地下水の一部は武蔵野台地上小流域に流入している可能性がある。

多摩川流域の水収支解析における課題に上流山地の降雨補正がある。これについては、補正なしで計算した場合の調布橋流域と石原観測所流域の地下水収支の差分が $6.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ($=1.9 - (-4.4)$) と

求まる (Table 3) ことから、両観測点間での数 m^3/s 規模の地下水流出という結論には影響しない。しかし、補正した結果の平均 $9.0 \text{ m}^3/\text{s}$ との差 $3.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 弱は補正による影響であり、今後密な気象データを用いて検討精度の向上を期す必要がある。一方、実蒸発散量に関しては、石原観測点流域の実蒸発散量が $440 \text{ mm}/\text{y}$ 弱と求まっている。やや少なめの値ではあるが、本論中の議論を踏まえるとそれが極端に大きくなることは考えにくい。ため、実蒸発散量の評価精度が向上した場合でも検討結果に与える影響は少ないものと考えられる。

3-2 入間川上流成木川両郡橋、霞川金子橋流域

霞川金子橋流域の地下水収支はほぼ均衡ないしわずかに黒字、成木川両郡橋流域は明らかな黒字となる。この結果は、ともに他流域（あるいは深部帯水層）への地下水流出のあることを示している。また、流域内での地下水汲み上げは少量であり、したがって基底流出に関わる帯水層からの地下水揚水も少量とみなせることから、地下水涵養量と基底流出量の差のほぼ全量が他流域（あるい

Fig. 16 Phreatic water table contours for the study area (after the Japan Ground Water Technology Association, 2001)

は深部帯水層)への地下水流出に関わることが推定できる。両流域とも入間川最上流の地下水涵養域にあることを考慮すると当然の結果と判断できる。

なお、当該2流域も高標高部降水量補正の影響をうける流域であるが、補正なしでの計算でも結果は同様である。入間川上流並びに武蔵野台地小流域の水収支評価上の課題もいくつかあるがこれについては次項であわせて述べる。

3-3 武蔵野台地南部中小河川柳瀬川、落合川、石神井川、神田川流域

柳瀬川は黒字であるが残り3流域はいずれも赤字となる。単純に4つの中小河川を合計した水収支 (Fig.14) では、303 mm/y ($2.2 \text{ m}^3/\text{s}$) の赤字 (地下水流入) が見込まれる。個別流域の地下水収支の経時変化 (Fig.15) を見ても3つの流域の収支は常に赤字側にある。

ここで、武蔵野台地上の小流域内の地下水汲み上げが、地下深くの深部帯水層からのものか、流域の基底流出に関わる比較的浅部の帯水層中からのものであるかどうかで区別できていないことが問題になる。上記した303 mm/y ($2.2 \text{ m}^3/\text{s}$) の地下水流入は、全ての地下水揚水が浅部帯水層からのものであることを想定しているが、実際には現実的ではないと考えられる。いま仮に浅部帯水層からの地下水汲み上げを0とすると、基底流出量と地下水涵養量の差140 (= 706-566) mm/y、すなわち $1 \text{ m}^3/\text{s}$ が他流域あるいは深部帯水層からの地下水流入と考えることができる。現在知られる当該流域の深度方向地下水ポテンシャル分布 (例えば Taniguchi *et al.*, 1999) によると、深部帯水層からの上向きの地下水流動は考えられないため、この量 (+深部帯水層への漏水量) は全て他流域からの流入量に相当すると推定できる。このように、特に地下水収支が赤字となる場合には、地下水汲み上げ量の帯水層別整理が重要となる。

一方、上記から明らかなように地下水流入規模は地下水涵養量の規模に左右されることから、タンクモデルの再現性次第で水収支解析結果は大きく変わり得る。今回は既往の研究成果にある不老

川流域流況をタンクモデル検定の指標にしたが、本来は、当該流域での連続流量観測データやさらには浅部帯水層の地下水位連続観測データを再現対象にしてモデル同定を行い、精度の高い水収支評価を行う必要がある。

3-4 関東平野南西域の地下水涵養・流動機構

地下水収支の計算結果から、青梅市調布橋～調布市石原地点間の多摩川河床から数 m^3/s 規模の河川水が地下水となり他流域へ流出することと、武蔵野台地中小河川へ他流域から $1 \sim 2 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度の地下水流入があることが推定された。一方、同じく多摩川に隣接する鶴見川流域については地質特性上、多摩川流域内地下水との往来は考え難いことが分かっている。さらに入間川上流小流域に関しては、水収支の結果を見る限り多摩川流域からの地下水流入は否定的である。以上は、多摩川流域から流出した地下水は武蔵野台地あるいは首都圏沖積低地域に向かって流動し一部は武蔵野台地小河川流域内に流出することを強く示唆している。先の3-1で述べたように、このことは既往の研究で解明されている当該域の断面地下水ポテンシャル分布や不圧地下水の地下水面分布とも良く整合する。

V. まとめと今後の課題

関東平野南西域の地下水収支解析を通して以下のことが明らかになった。なお、この検討の過程でGISの空間解析機能の利用が効果的であることを示すことができたと思う。

- (1) 多摩川上流域山地部の平均可能蒸発散量は 600 mm/y 程度と推定され、実蒸発散量は従来いわれる値よりかなり小さい可能性がある。
- (2) 東京都と埼玉県の上水道漏水量はともに現在10%未満程度である。また現在の下水道普及率は東京都・市部で90%、埼玉県で70%程度である。とくに過去にさかのぼった水収支解析においては、水道漏水量と下水道未普及地区からの排水量の影響が大きいと考えられることから、そうしたデータの整理・分析が重要である。

- (3) 多摩川本川流域の長期概略水収支解析の結果では、青梅市調布橋から調布市石原地点間の多摩川流域から隣接他流域へ数 m^3/s 規模の地下水流出が続いていることが推定される。地下水ポテンシャル分布や水理地質構造を考慮するとそれらのほとんどは、首都圏沖積低地下に連続する深部帯水層中と隣接武蔵野台地上の中小河川流域へ流出していると推定できる。その配分は深部帯水層中に流入する量の比率が大きく、武蔵野台地上中小河川流域への流出比率は小さい。
- (4) また、入間川上流小流域では最大で $2 \text{ m}^3/\text{s}$ 未満の地下水流出、武蔵野台地上小流域（合計）では $1 \sim 2 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度の地下水流入が推定される。武蔵野台地上小流域への地下水流入の兆候は、その絶対量については評価精度に課題が残るものの、多摩川流域からの定常的な地下水流出の可能性と良く整合する。

以上、地下水ポテンシャルなどの地下水流動の指標となる要素の調査とともに水収支解析も広域地下水流動研究に有効であることを示すことができたと考えられる。

一方、これらの成果を踏まえた上で、関東平野南西域あるいは関東平野全域の地下水流動機構の詳細把握に必要な課題を整理すると以下ようになる。なお、こうした課題の解決を通して地下水上昇問題解消に繋がる地下水管理方策の立案・策定が可能になるものと思われる。

- (1) 水収支要素の整理の過程で山地部降水量の補正を行ったが、今後はより密な気象データに基づいた分析を行い、水文現象実態の正確な把握を通して水収支の精度を向上させる必要がある。
- (2) 水収支結果から推定される地下水流出入量（他流域などとの地下水往來の量）の評価精度は地下水涵養量の評価精度に依存することから、流量連続観測や地下水位連続観測などのデータを再現対象としてモデルの再現性向上を期す必要がある。また、流量連続観測などデータの不足するものについてはその取得を目指す必要がある。また同様に、地下水利用量の総量

並びに帯水層別整理も水収支評価精度を左右するため、そのデータの吟味・分析が重要となる。

- (3) 水収支解析結果の妥当性の検証には地下水ポテンシャルなどの地下水流動の指標となる要素の調査が不可欠である。たとえば多摩川流域から武蔵野台地上小流域に向かう地下水流動の存在を確認・検証するためには、面的・経時的な地下水ポテンシャル調査が適切に行われる必要がある。
- (4) このような研究成果の検証とともに、首都圏沖積低地の地下水の動向監視のためにも、地下水ポテンシャルや環境同位体など地下水流動の指標となる要素の調査を今後も継続する必要がある。
- (5) 関東平野規模の地下水流動系の把握には、多摩川流域とそれに隣接する小流域以外についても広域的な観点から水収支を検討する必要がある。より広い関東地下水盆全体を対象に一括した水収支解析の実施が課題である。
- 今後も、地下水上昇問題の解決に向けて、ここに挙げた課題に取り組んで行くこととしたい。

参考文献

- 石井 求・遠藤 毅・川島真一・川合将文(1975): 被圧地下水の流動に関する研究(1). 昭和50年度東京都土木技術研究報告, 183-205.
- 石井武政・安原正也(2000): 都市域の地下水環境. 日本水文科学会誌, 第30巻, 第2号, 73-80.
- 遠藤 毅・小笠原弘信・川島真一・川合将文(1981): 北多摩地区南部の水文地質構造と地盤沈下. 昭和56年度東京都土木技術研究報告, 165-180.
- 遠藤 毅・石井 求(1984): 東京都平野の水文地質と地下水位上昇に伴う諸現象. 応用地質, 第25巻, 第3号, 111-120.
- 遠藤 毅(1998): 東京都における最近の地下水問題. 地下水技術, 第40巻, 第6号, 14-25.
- 大森昌衛・端山好和・堀口万吉(編)(1986): 関東地方, 日本の地質3. 共立出版.

神奈川県 (1969 ~ 1999) : 神奈川県地盤沈下調査結果.

榎根勇 (2000) : 20 世紀の地下水と私. 地下水技術, 第 42 巻, 第 10 号, 1-5.

(社)雨水貯留浸透技術協会 (2000) : 都市小流域における水循環系の定量化手法—水循環系の再生に向けて—, 「都市小流域における雨水浸透, 流出機構の定量的解明」研究会(編). 139p.

埼玉県 (1975 ~ 2000) : 埼玉県地盤沈下調査報告書.

埼玉県 (1979 ~ 2000) : 埼玉県統計年鑑.

斎藤 庸・吉田義一・許成 基・大串弘哉(2000) : 支笏火山灰地域の水文特性(その 3) —美々川流域における水収支と地下水涵養機構—. 日本地下水学会 2000 年秋季講演会講演要旨, 8-15.

斎藤 庸・肥田 登・三宅紀治 (2001) : 六郷扇状地の地下水流動と今後の地下水管理. 日本地下水学会 2001 年秋季講演会講演要旨, 146-151.

斎藤 庸・久保田勝・石川俊之・大角一浩・坂森計則 (2002) : 庄川扇状地の水文特性—地下水涵養機構と地下水収支—. 日本地下水学会 2002 年秋季講演会講演要旨, 156-159.

嶋田 純 (2000) : 水循環から見た地下水保全と 21 世紀への提言. 日本水文科学会誌, 第 30 巻, 第 2 号, 63-72.

菅原正巳 (1972) : 流出解析法. 共立出版. 257p.

(社)地下水技術協会 (2001) : 多摩川流域地下水調査業務報告書.

土屋十圀 (1997) : 都市中小河川の水文環境その 1 野川の水量の歴史的視点と涵養域. 水利科学, 第 41 巻, 第 2 号, 1-16.

土屋十圀・和泉 清 (1991) : 野川の長期低水流出解析. 平成 3 年東京都土木技術研究所年報.

153-162.

東京都 (1978 ~ 1999) : 東京都統計年鑑.

東京都環境保全局 (1972 ~ 1999) : 都内の地下水揚水の実態.

東京都環境保全局 (1975 ~ 2000) : 公共用水域及び地下水の水質測定結果.

(社)日本河川協会 (1976 ~ 2001) : 流量年表. 国土交通省河川局 (監修).

三宅紀治 (2000) : 首都圏における被圧地下水の課題と今後. 地下水技術, 第 42 巻, 第 10 号, 24-31.

山本莊毅 (1983) : 新版地下水調査法. 古今書院.

(財)リバーフロント整備センター (2000) : 鶴見川とその流域の再生—流域水マスタープラン策定に向けた提言—. 国土交通省関東地方整備局京浜工事事務所 (監修). 419p.

Kayane, I., Ogasawara, H. and Yoshida, M. (1993): Four-dimensional response of the aquifer and aquitard system in Tokyo to groundwater withdrawal and regulation. Environmental Research Center Papers, Univ. of Tsukuba, 16, 53p.

Taniguchi, M., Shimada, J., Tanaka, T., Kayane, I., Sakura, Y., Shimano, Y., Dapaah-Siakwan, S., and Kawashima, S. (1999): Disturbances of temperature-depth profiles due to surface climate change and subsurface water flows: 1. An effect of linear increase in surface temperature caused by global warming and urbanization in the Tokyo metropolitan area, Japan. Water Resources Research, Vol.35, No.5, 1507-1517.

(受付 2003年 3月 3日)

(受理 2003年 6月 4日)