



水流れに水・空気二相流が考慮されていることに加え、地表水流と地下水流との完全な連成解析が可能である。また、有限差分法では本来完全矩形のメッシュ形状を対象とするが、コーナーポイント型格子を採用することにより、複雑な地形モデルにも柔軟に対応することが可能となっている<sup>3) 4)</sup>。

なお、流域水循環系における流体運動方程式は、一般化されたダルシーの法則に基づいた水・空気 2 相圧縮性流体システムとして記述する。これらは次に示す標準状態における質量収支式として表わされる。

$$\nabla \left( \frac{Kkr_w}{\mu_w B_w} \nabla \psi_w \right) - q_w = \frac{\partial \phi S_w}{\partial t}$$

$$\nabla \left( \frac{Kkr_g}{\mu_g B_g} \nabla \psi_g \right) = \frac{\partial \phi S_g}{\partial t}$$

|          |                       |                |
|----------|-----------------------|----------------|
| $K$      | : 絶対浸透率               | $[m^2]$        |
| $kr_w$   | : 水相の相対浸透率            | $[-]$          |
| $kr_g$   | : 空気相の相対浸透率           | $[-]$          |
| $\psi_w$ | : 水相の水理ポテンシャル         | $[Pa]$         |
| $\psi_g$ | : 空気相の水理ポテンシャル        | $[Pa]$         |
| $S_w$    | : 水相の飽和度              | $[-]$          |
| $S_g$    | : 空気相の飽和度             | $[-]$          |
| $\phi$   | : 有効間隙率               | $[-]$          |
| $\mu_w$  | : 水相の粘性係数             | $[Pa \cdot s]$ |
| $\mu_g$  | : 空気相の粘性係数            | $[Pa \cdot s]$ |
| $B_w$    | : 水相の容積係数             | $[-]$          |
| $B_g$    | : 空気相の容積係数            | $[-]$          |
| $t$      | : 時間                  | $[s]$          |
| $q_w$    | : 単位時間、単位体積当たりの生産地下水量 | $[m^3/m^3/s]$  |

ここで、地表水流動は、水深が流れの幅に対して十分小さい浅水流と仮定した拡散波近似を適用した運動量保存式により評価される。これに、マニング型の平均流速公式を組み合わせると、数式上は上式と同形式の地表水、地下水の連成挙動を考慮した水循環モデルの基礎式を得ることができる。これらを数値的に解くことで、二相流れの流動方程式における任意の時刻・空間での、圧力・水飽和度を得ることができる。

#### 4. 解析手順

現況再現解析では、はじめに、流況が定常状態の近年の流況を対象とし、平均的な降水量（30 年平均

値（1981～2010 気象庁メッシュ平均値）、地下水揚水条件（2012～2014 年の平均値）を、時間変化を考えない一定条件として与え続けた定常解析を平衡状態に達するまでの期間を行う。定常解析結果では、地下水位と比較し構築モデルの再現性を検証する。

次に、解析対象年である 2014 年（後述）を対象とした、日単位の気象条件を与えた非定常解析を実施する。2012 年～2013 年の 2 年間をその助走期間として加えて、のべ 3 年間の現況再現解析を行う。この助走期間には月単位の気象条件を与える。2014 年の現況再現結果は、時間変動パターンに着目して観測データと比較・検証を行い、構築モデルの再現性を考察する。観測値と解析結果との乖離が認められる場合には、モデルの見直しを行い、再計算を繰り返す。以上の現況再現解析により、解析モデルが確定する。その後、地下水揚水や下水処理等の水利用条件を除いた自然流況の復元解析、及び特定の条件を設定した解析（後述）を行う。解析手順を図-2 に示す。

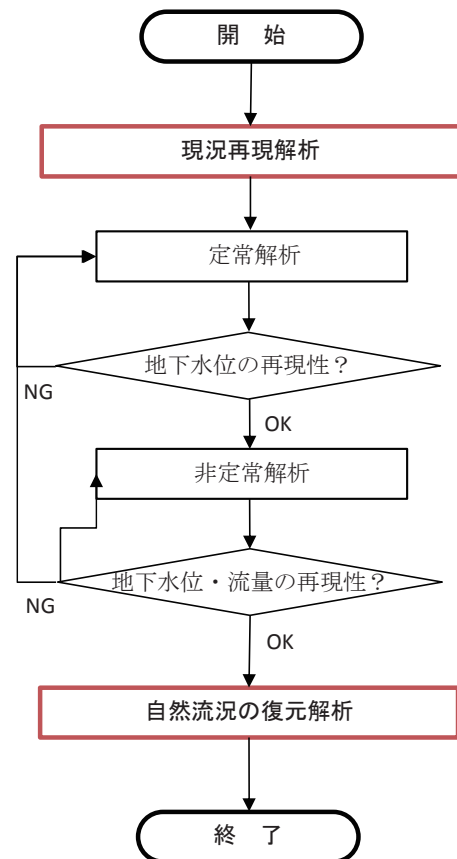


図-2 解析手順

## 5. 武蔵野台地モデル

### (1) 地質構造モデル

対象領域の浅層地質を重視した 3 次元水理地質構造モデルを構築した。具体的には、本検討で対象とする水理地質区分と層序を確定し、領域全体の地質模式図を作成した。解析領域は広範囲にわたっているが、武蔵野台地を開削して流れている中小河川の源頭から中流部の範囲は、広い武蔵野台地で、その水理地質構造は比較的単純化することが可能であった。

武蔵野台地の浅層地下水を胚胎する重要な地層である段丘砂礫層については、ボーリング調査結果をまとめた既存資料<sup>5)</sup>の断面図で、武蔵野礫層は 5m～15m 程度、立川礫層は 5m 程度の厚さとなっていることから、段丘砂礫層の厚さは 10m として、モデルに組み込んだ。表-1 に作成した 3 次元地質構造モデルの層序構成を示す。

表-1 地質区分（層序表）

| 大区分              | 区分        | 記号  | 備考                                     |
|------------------|-----------|-----|----------------------------------------|
| 表土               | 表土        | TS  |                                        |
| 沖積層              | 沖積粘土主体    | AC  | 台地の中の谷地に堆積した粘土層                        |
|                  | 沖積砂・砂礫主体  | AS  | 粘性土との互層、主要部では粘性土層が半分程度を占める。            |
| 段丘堆積物            | ローム       | LM  | 縦方向のクラックが発達。根系も貫入する透水層                 |
|                  | 凝灰質粘土     | TC  | 常総粘土ほど粘土化していない可能性あり。難透水層               |
|                  | 段丘砂礫層     | MTG | 立川礫層、武蔵野礫層他。透水層                        |
|                  |           |     |                                        |
| 下総層群～<br>上総層群最上部 | 東京層       | TOS | 砂、粘土、砂礫。砂層を対象にした透水試験データ有。山の手台地では粘土も多い。 |
|                  | 東京礫層      | TOG | 砂礫。山の手西部では、段丘礫層と区別が難しい。                |
|                  | 高砂層・江戸川層  | TE  | 砂・砂礫互層。砂層を対象にした透水試験データ有。シルト層を挟む        |
|                  |           |     |                                        |
| 上総層群             | 芋窪礫層・舍人層・ | TN  | 情報少ない。段丘砂礫層の最低値に近い。低透水層。               |
|                  | 東久留米層     | HG  | 情報少ない。砂主体、詳細不明。高砂・江戸川層の最低値             |
|                  | 東久留米層西部*  | HGW | 一般部に比較しシルトを多く挟み低透水                     |
|                  | 北多摩層上部*   | KTs | 一般部に比較し砂層を多く挟み高透水                      |
|                  | 北多摩層・それ以下 | KT  | 情報少ない。シルト層主体、ただし砂層を挟むとみられる。難透水層。       |
|                  |           |     |                                        |
| 基盤岩類             | 基盤岩類      | BR  | 風化区分                                   |

### (2) 水理パラメータ

表-2 に、地質区分毎の透水係数、有効間隙率の初期設定値、及び現況再現解析を通じて同定された値を示す。透水係数の初期設定値は既存資料<sup>6)～8)</sup>を元に幅を算出し、概ねその中央値となる値を設定した。有効間隙率に関しては、一般的な値を初期値として設定した<sup>9)</sup>。

表-2 水理パラメータ

| 地質区分         | 記号  |                               | 透水係数 <sup>9)</sup> (cm/s)<br>同定値 (初期設定値)                                                     | 有効間隙率 (%)<br>同定値 (初期設定値) |
|--------------|-----|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| 表土           | TS  | 盛土、埋立土                        | 1×10 <sup>-2</sup> (1×10 <sup>-2</sup> )                                                     | 40 (40)                  |
| 沖積層          | AC  | 粘土主体                          | 1×10 <sup>-4</sup> (1×10 <sup>-6</sup> )                                                     | 30 (30)                  |
|              | AS  | 砂・砂礫主体                        | H: 1×10 <sup>-2</sup> (1×10 <sup>-6</sup> )<br>V: 1×10 <sup>-3</sup> (1×10 <sup>-4</sup> )   | 30 (30)                  |
| ローム層<br>段丘礫層 | LM  | ローム                           | 5×10 <sup>-3</sup> (5×10 <sup>-3</sup> )                                                     | 20 (20)                  |
|              | MTG | 段丘砂礫層 (立川礫層 Tg, 武蔵野礫層 Mg など)  | 1.5×10 <sup>-4</sup> (1×10 <sup>-4</sup> )                                                   | 30 (30)                  |
| 凝灰質粘土層       | TC  | (23 区西縁から以東に分布、厚い所で層厚 5m に及ぶ) | 1×10 <sup>-7</sup> (1×10 <sup>-7</sup> )                                                     | 20 (20)                  |
| 東京層群         | TOS | 東京層                           | H: 1×10 <sup>-4</sup> (1×10 <sup>-4</sup> )<br>V: 1×10 <sup>-5</sup> (1×10 <sup>-5</sup> )   | 30 (30)                  |
|              | TOG | 東京礫層                          | 1×10 <sup>-2</sup> (1×10 <sup>-2</sup> )                                                     | 30 (30)                  |
|              | TE  | 高砂層・江戸川層                      | H: 1×10 <sup>-3</sup> (1×10 <sup>-3</sup> )<br>V: 1×10 <sup>-5</sup> (1×10 <sup>-4</sup> )   | 30 (30)                  |
|              | TN  | 芋窪礫層・舍人層                      | H: 1×10 <sup>-2</sup> (1×10 <sup>-3</sup> )<br>V: 1.5×10 <sup>-6</sup> (1×10 <sup>-5</sup> ) | 20 (20)                  |
| 上総層          | HG  | 東久留米層                         | H: 1×10 <sup>-2</sup> (1×10 <sup>-4</sup> )<br>V: 5×10 <sup>-6</sup> (1×10 <sup>-4</sup> )   | 30 (30)                  |
|              | HGW | 東久留米層西部                       | H: 1×10 <sup>-4</sup> (—)<br>V: 1×10 <sup>-6</sup> (—)                                       |                          |
|              | KTs | 北多摩層上部                        | H: 3×10 <sup>-3</sup> (—)<br>V: 1×10 <sup>-5</sup> (—)                                       | 20 (20)                  |
|              | KT  | 北多摩層及びその他                     | H: 3×10 <sup>-4</sup> (1×10 <sup>-6</sup> )<br>V: 1×10 <sup>-6</sup> (1×10 <sup>-6</sup> )   |                          |
| 基岩層類         | BR  | 古崩岩類 (堆積岩, 火成岩, 変成岩等)         | 1×10 <sup>-8</sup> (1×10 <sup>-8</sup> )                                                     | 0.5 (0.5)                |

※現況再現解析のマッチングを経て確定された同定値を示す。括弧内の透水係数は初期設定値を示す。

### (3) 解析モデル

解析モデルの作成手順は、最初に対象領域の平面格子分割から行う。格子サイズは、河道周辺における格子分割サイズを細密にし、河道から離れるほど粗く分割を行った。平面格子モデルを図-3 に示す。次に、平面格子モデルを深度方向へ押し出し、三次元格子モデルを作成した。深度方向のモデル化範囲は、地表水・地下水相互作用を適切に解析できる十分な範囲として標高-2,500m までを対象とした。深度方向の格子分割数は地上付近及び浅層を細密に、深さ方向に次第に粗くなるよう分割した。また、深度方向の格子分割は、3 次元地質構造モデルの各地質区分、分布範囲や層厚を考慮している。作成した 3 次元格子モデルを図-4 に示す。深度方向の格子層数は 30 層、3 次元格子の総数は 708,540 である。



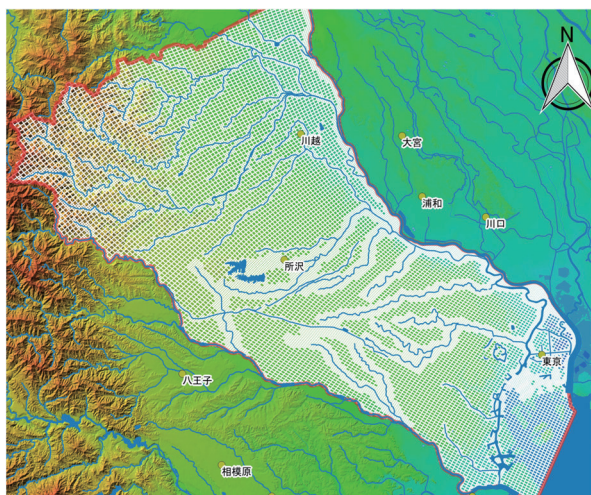


図-3 平面格子モデル

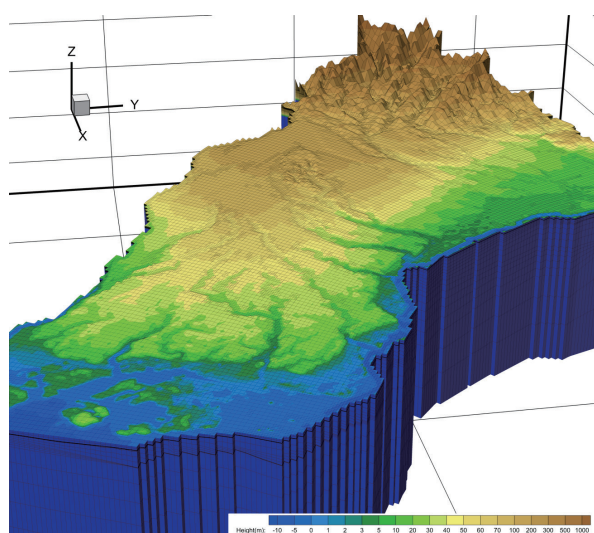


図-4 3次元格子モデル（標高）

#### (4) 解析対象期間

解析対象期間の検討に際して、武蔵野台地モデルの解析領域における5箇所の代表雨量観測地点（気象庁アメダス）を選定し、最近10年間（2005～2014年）の年降水量の経年変動を参考とした。

最近10年間での年降水量の少ない年から順に（昇順）並べると表-3のようになる。表-3によると、2012～2014年の年降水量は、観測地点によりバラツキはあるが、おおそ10年間で第3位から第8位に位置している。また、現在の河川改修事業について検討するためになるべく最近の期間を対象とすることなどを勘案して、2012～2014年を解析対象期間とした。

表-3 代表雨量観測地点における年降水量順位

| No. | 所沢   |         | 鳩山   |         | さいたま |         | 練馬   |         | 世田谷  |         |
|-----|------|---------|------|---------|------|---------|------|---------|------|---------|
|     | 年    | 年降水量    | 年    | 年降水量    | 年    | 年降水量    | 年    | 年降水量    | 年    | 年降水量    |
| 1   | 2005 | 1,302.0 | 2009 | 1,105.5 | 2012 | 1,175.0 | 2007 | 1,344.0 | 2005 | 1,374.0 |
| 2   | 2007 | 1,307.0 | 2010 | 1,188.0 | 2007 | 1,227.0 | 2005 | 1,456.0 | 2007 | 1,393.0 |
| 3   | 2013 | 1,311.0 | 2013 | 1,206.0 | 2013 | 1,287.5 | 2013 | 1,527.5 | 2011 | 1,439.0 |
| 4   | 2009 | 1,357.5 | 2007 | 1,251.0 | 2009 | 1,311.0 | 2011 | 1,553.5 | 2012 | 1,608.0 |
| 5   | 2012 | 1,448.5 | 2012 | 1,269.0 | 2005 | 1,312.0 | 2012 | 1,556.0 | 2013 | 1,645.0 |
| 6   | 2011 | 1,450.0 | 2005 | 1,332.0 | 2010 | 1,336.5 | 2009 | 1,655.5 | 2010 | 1,750.0 |
| 7   | 2014 | 1,593.5 | 2011 | 1,396.5 | 2011 | 1,381.5 | 2014 | 1,740.0 | 2009 | 1,766.5 |
| 8   | 2006 | 1,619.0 | 2008 | 1,401.0 | 2014 | 1,444.5 | 2010 | 1,747.5 | 2014 | 1,917.5 |
| 9   | 2010 | 1,707.0 | 2006 | 1,441.0 | 2008 | 1,538.0 | 2008 | 1,807.0 | 2006 | 1,928.0 |
| 10  | 2008 | 1,817.0 | 2014 | 1,651.5 | 2006 | 1,703.0 | 2006 | 1,990.0 | 2008 | 1,960.5 |

#### (5) 雨水排水

下水幹線から処理場へ収集される雨水排水は、地下地層内へ浸透しない損失雨量となる。本解析では、下水処理区毎の雨量の20%を損失雨量と仮定し、それぞれの処理区へ与えられる降水量から差し引いた。降水量から差し引かれた損失雨量は下水処理場から放流するモデルとした。

#### (6) 揚水

地下水揚水量データは、月単位の行政区別のデータとして得られている<sup>10) 11)</sup>。解析対象期間である2012年～2014年の3年間に対しては、これらの地下水揚水量を月単位データとして直接与えた。また、取水層は深度100m以深に分布する東京層・東京礫層・高砂層・江戸川層・東久留米層の最上層からの取水を基本とし、深度100m以深に該当地質が存在せず、上部に存在する場合などは該当地質の最下層から取水を行うこととした。深度10mより浅い場合は取水層の対象とはしていない。

#### (7) 境界条件

境界条件は、解析領域の北側及び南西側の境界は、流体の出入りがない閉境界（非流出・不浸透境界）とした。ただし、多摩川右岸側からの地下水流入が推定されるため<sup>12)</sup>、一部定圧境界（地下水位固定境界）としている。一方、北東側の荒川左岸側へは地下水流出が推定されるため<sup>13)</sup>、定圧境界とした。領域南東側の海域は、海水位を標高0mとした水位固定条件（定圧境界）、モデル底面は閉境界（非流出・不浸透境界）とした（図-5）。上面は、最上層の第1層に大気層、第2層に地表層を設け、大気層には標準大気圧0.1013MPa、地表層には降水量と蒸発散量の差（有効降水量）を与えた。

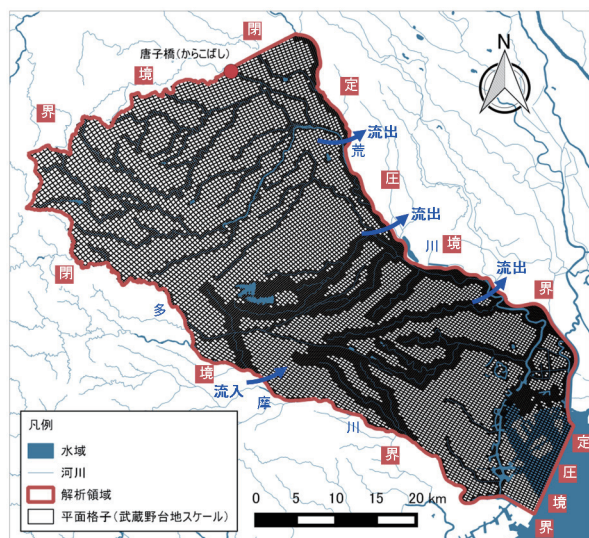


図-5 境界条件

## 6. 現況再現解析

### (1) 解析条件

4. 解析手順で述べた現況再現解析の再現性検証は、地下水位、河川流量、湧水等の測定データとの比較を通じて行い、解析結果と測定値に差異が認められる場合は、必要な見直しと改良を加えてトライアンドエラー解析を繰り返した。この一連の解析では、河道及びその周囲の格子サイズが500mのAモデルと、格子サイズを精緻に分割したBモデルを使用した。すなわち、初期の多数のトライアンドエラー解析は格子数の少ないAモデルを用いて行い、その検討結果を計算格子数が多いBモデルへ反映してより効率化な検証を行う手法をとった。

### (2) 地下水位

Aモデルで透水係数の設定値及び境界条件の関する見直しを行った結果、得られた解析条件をBモデルへ組み込み、透水係数の再調整を行い再現解析を実施した。図-6はその最終的な解析結果と地下水観測値の相関を示した図であり、相関を表す決定係数 ( $R^2=0.95$ ) で再現性を確認できる結果となったので、このBモデルを最終的な解析モデルとした。

### (3) 河川流量

図-7は、解析結果と観測値の河川流量を例として空堀川で、上流から下流へ並べて比較したものである。観測値は複数回の観測平均値、解析値は2014年

の非定常解析結果の計算平均値を用いた。下流側の解析流量は観測流量に対して2~5倍程度の差異が認められるが、上流から下流の河川流量の増減傾向は再現され、解析値と観測値ではほぼ整合する結果と言える。

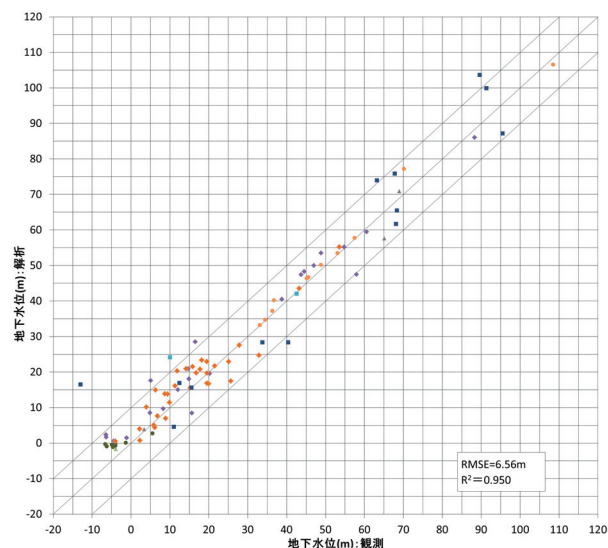


図-6 地下水位の観測値と解析結果の比較

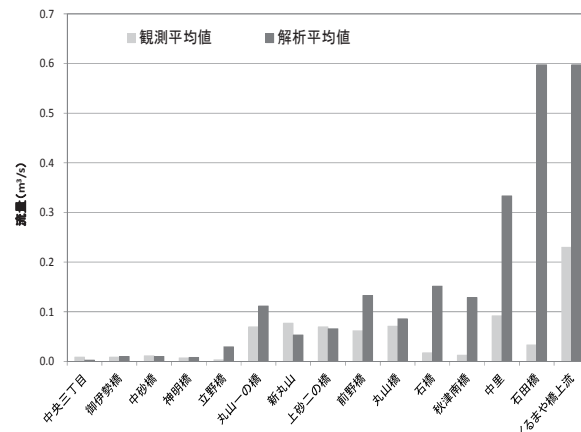


図-7 河川流量の観測値と解析結果の比較

### (4) 自然流況の復元解析結果との比較

次に、現況再現解析と、4. 解析手順でも述べた自然流況の復元解析から得られた不圧地下水位の等高線を、それぞれ図-8、図-9に示す。現況再現解析結果の等高線は、自然状態の解析結果と比較して地形起伏の影響はやや緩和される結果となった。これは、東京都内の西部の武蔵野台地上で顕著であり、地下



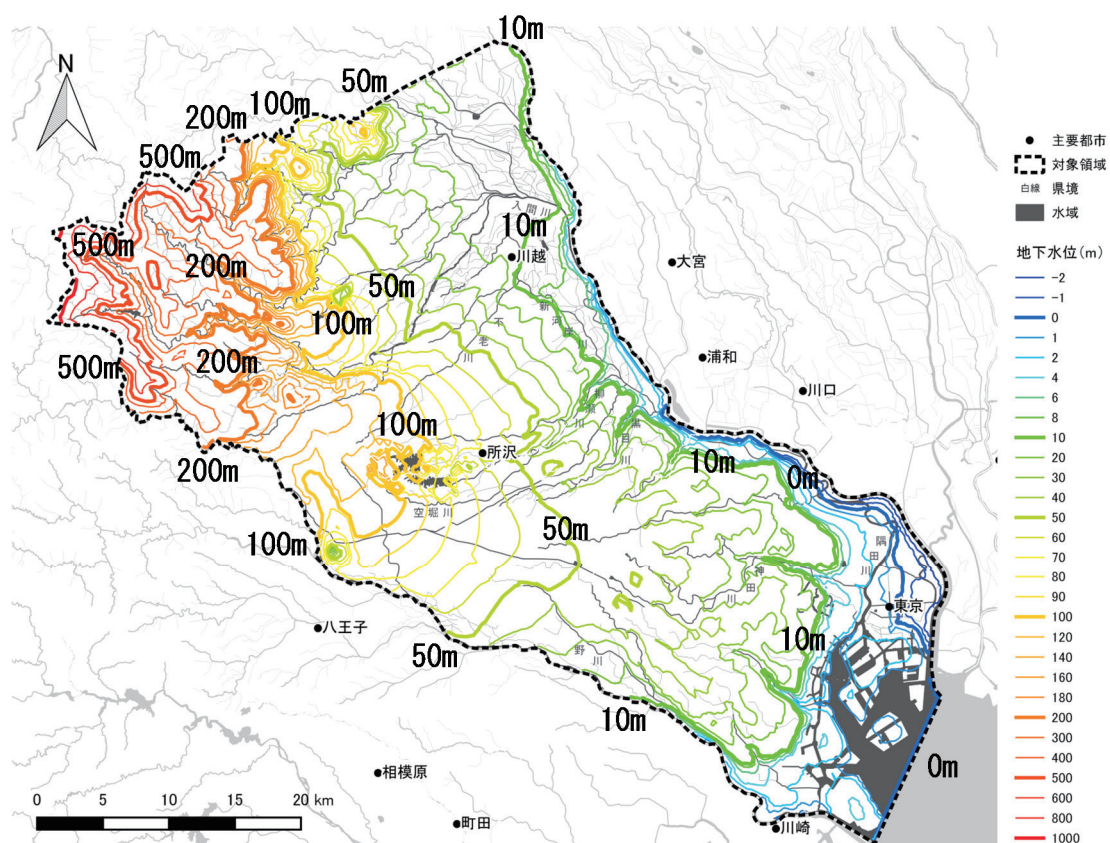


図-8 地下水位等高線（現況再現解析）

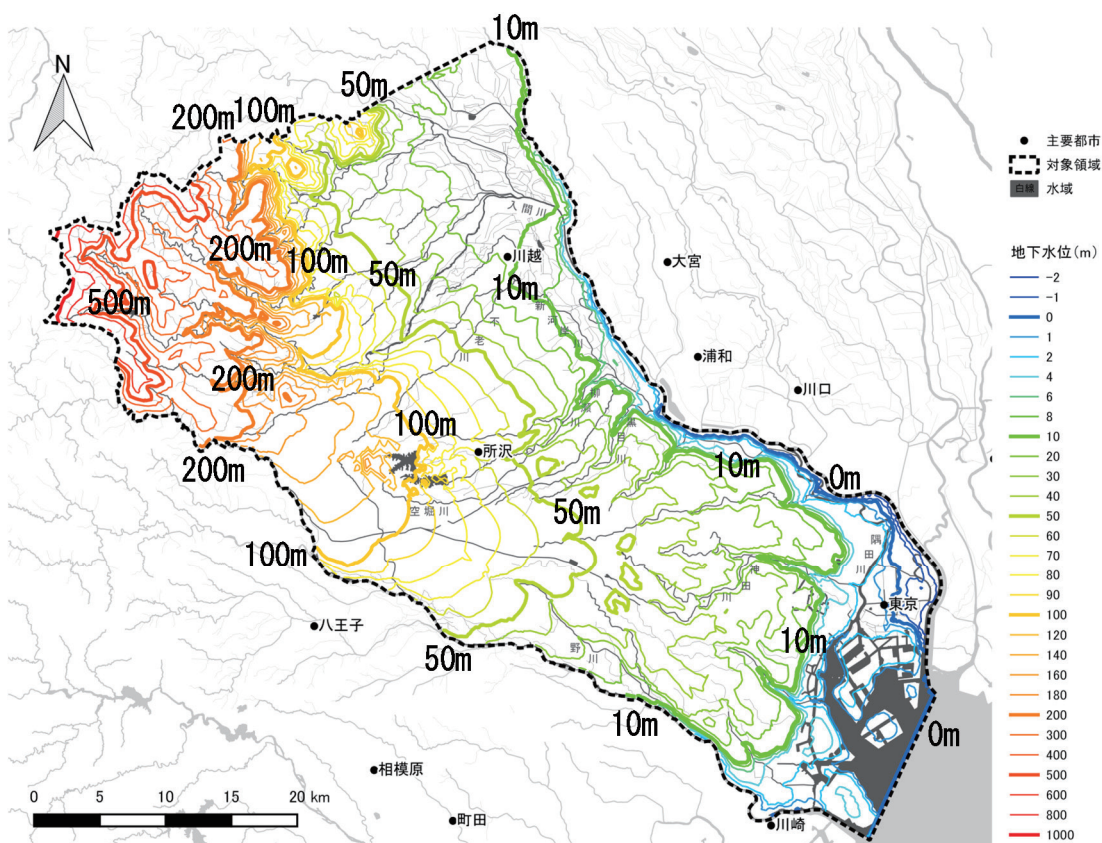


図-9 地下水位等高線（自然流況復元解析）

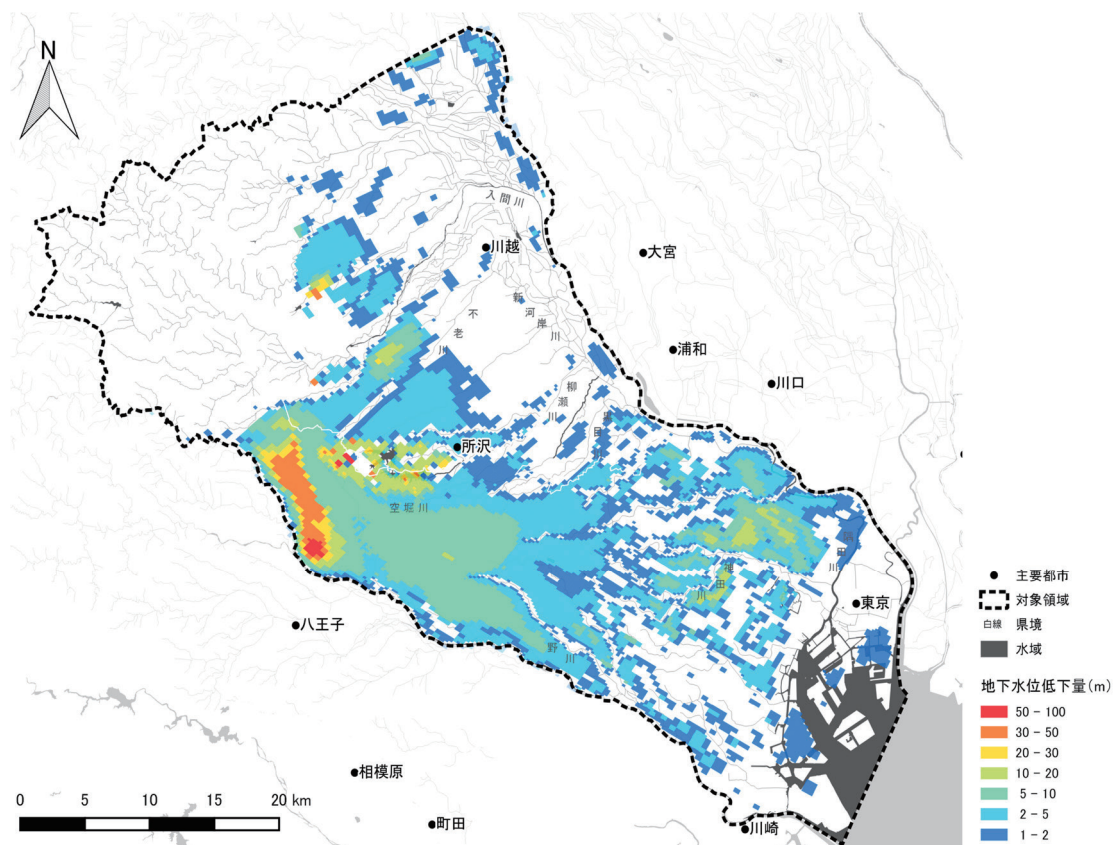


図-10 地下水位差分コンター（現況再現-自然状態）

水揚水による水位低下の影響である。また、図 -10 に示した地下水位等高線の差分コンターは、地下水揚水等の水利用によって低下したと考えられる水位を表した図である。武蔵野台地中央部では 5m~10m 地下水位低下が生じており、このような浅層地下水面の低下は、河川への湧水低下や流量に影響を及ぼすものと考えられる。多摩川沿い定圧境界付近に、境界条件の影響と思われる水位差が大きい箇所があり、今後のモデル化において精度向上が必要である。

## 7. 水循環特性解析

以上の結果をもとに、次に、模擬的な降雨条件による非定常解析を実施し、武蔵野台地全体の現況再現解析との水収支の比較、各河川の流況と水涸れ発生などの特性について比較・検討を行った。

### (1) 武蔵野台地の水収支

ここで、武蔵野台地モデルの全体に対して、地上、地下のそれぞれに分けた領域に対して集計する水収支の考え方を図-11 に示す。地上、地下のそれぞれの

貯留量変化は次式により表される。

地上：貯留量変化＝①降水量＋④a 地表水流入量＋⑤b 地下水湧出量＋②事業所排水量－③地表水蒸発量－④b 地表水流出量－⑤a 地下水涵養量

地下：貯留量変化＝⑤a 地下水涵養量＋⑥a 地下水流入量－⑤b 地下水湧出量－⑥b 地下水流出量－⑦ 土壤蒸発量－⑧ 地下水揚水量

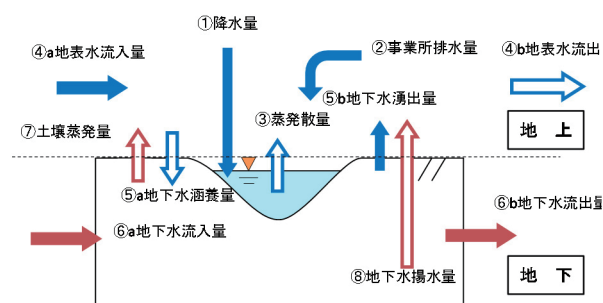


図-11 水収支の概念



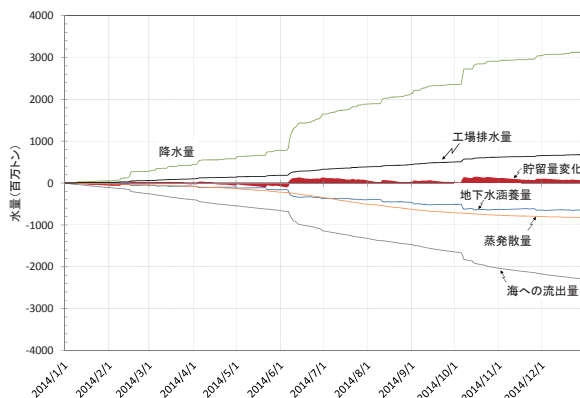
## (2) 極端な渇水条件

武蔵野台地の主な河川の渇水時の特性を評価する1つの試行解析として、極端な渇水条件を想定したモデル降雨を用いた非定常解析を実施した。ここでは、ある時点で降水量がゼロとなった異常渇水の想定として、2014年の高水位の時期にあたる7月1日の時点で降水を完全に停止させる解析を行った。

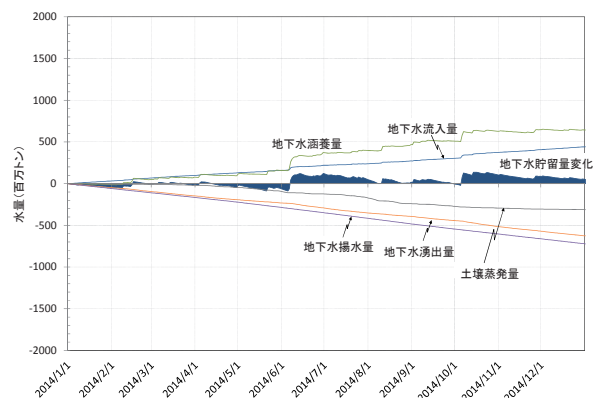
ここで、現況再現解析結果と降雨停止解析結果から、1月1日を起点とした、前述した水収支の内訳に対して累加変動を作成した。図-12には現況再現解析結果に基づく地上及び地下の水収支の累加変動を、図-13は降雨停止解析の地上及び地下の水収支の累加変動をそれぞれ示す。現況再現解析の結果によると、年間を通じての貯留量変化は数千万トンの範囲内でバランスし、一方的な水量の増加ないし減

少傾向を示すものではない。一方、図-13に示した降雨停止後は、降水による地表水の補給は一切増加せず、地下水涵養量による地下水の補給は地上に残った地表水からのわずかな補給のみとなりほぼ横ばいとなった。

次に、降雨を停止した場合の、主な河川のいくつかの地点について、河川毎に最も流量低下の早い地点を選定し、図-14で河川間の流量低減の傾向の違いを比較した。これによると、河川によって流量減衰の傾向は早いものと遅いものがあり、段丘上で河床の削り込みが比較的深い河川である黒目川、白子川、石神井川等は、流量が他の河川に比べて多く水涸れが発生し難く、河床の削り込みも浅い河川である空堀川、奈良橋川、残堀川、仙川は特に流量減衰の傾向が早いことがわかる。

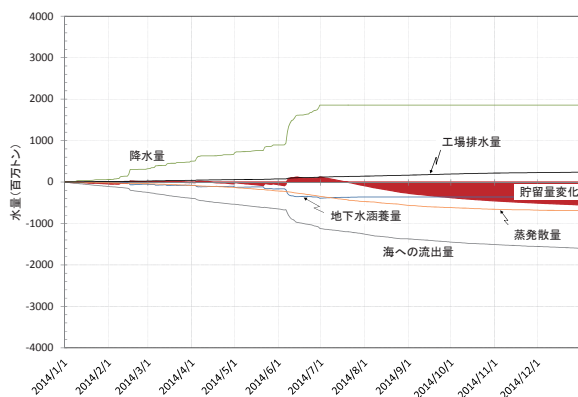


(地上)

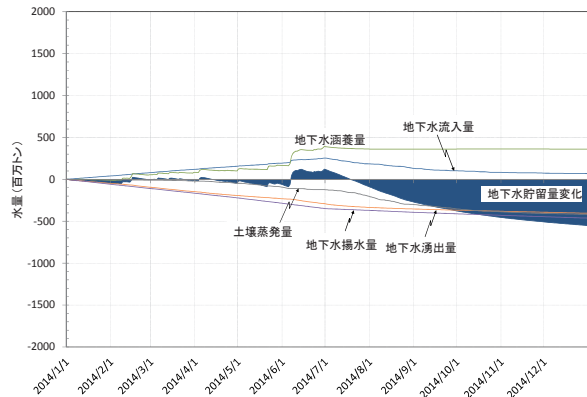


(地下)

図-12 水収支諸量の経時間変化（現況再現解析）



(地上)



(地下)

図-13 水収支諸量の経時間変化（7/1 降雨停止）



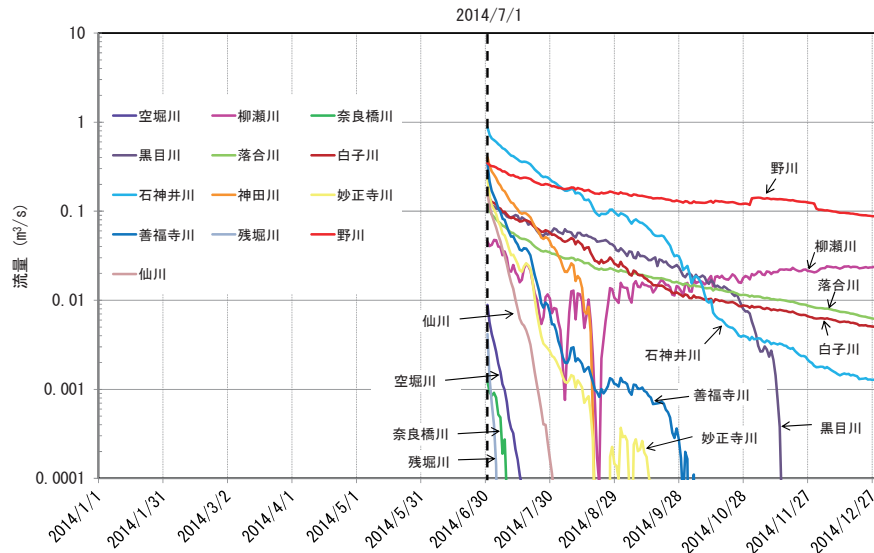


図-14 降雨停止後の河川別流量低減状況の比較

## 8. まとめ

### (1) 武蔵野台地の水循環特性

現況再現解析結果は、自然流況再現解析結果と比較して、武蔵野台地の中央部において地下水位の低下が認められることから、広域地下水流動に地下水揚水が与えている影響は大きいと考えられる。精度向上のためにも、より細分化された揚水データによるモデル化が必要である。

水循環特性解析からは、荒川水系の黒目川、白子川、石神井川等のように、段丘上で河床の削り込みが比較的深い河川は、流量が他の河川に比べて多く（元々河川沿いに湧水が多い）、水涸れが発生し難い要因となっている。一方、武蔵野台地面の比較的標高が高いところを流れ、河床の削り込みも浅い河川である荒川水系の空堀川中～上流部や多摩川水系の残堀川、仙川では水涸れが発生し易い状況にあると考えられる。

### (2) 今後の検討の方向性

平成 26 年成立の水循環基本法では、その基本理念の一つとして、健全な水循環の維持又は回復のための取組が積極的に推進されなければならないとされている。また、水循環基本計画では、効率的・効果的に課題を解決し、健全な水循環の実現を目指すことが基本的な考え方となっている。

今後は、武蔵野台地の広域的な水循環特性及び各河川特性結果をもとに、河川毎に河床高や河道形状、雨水排水路系統、地質構造をより詳細にしたモデルを構築し、流域毎の水循環特性と水涸れ現象の特徴を把握する水循環解析を進めていくことにより、河川流況及び周辺地下水の流動状況への影響を水循環解析により予測し、効率的・効果的な河道改修工法や水涸れ対策の検討にも反映させることができると考える。

## 参 考 文 献

- 1) 川合将文、川島眞一、国分邦紀（2014）：「河川の水量確保等に関する検討」の成果と課題、平 26. 都土木技術支援・人材育成センター年報
- 2) 川合将文、石原成幸、国分邦紀、高橋賢一（2011）：河川の水量確保を目的とした空堀川下流域の地下水環境調査、平 23. 都土木技術支援・人材育成センター年報

- 3) 登坂 博行、小島 圭二、三木 章生、千野 剛司 (1996) : 地表流と地下水流を結合した 3 次元陸水シミュレーション手法の開発、地下水学会誌 38(4), 253-267, 1996
- 4) 登坂 博行 (2002) : 地下水と地表水・海水との相互作用 9. 地表水流れと地下水流れの結合解析、地下水学会誌 44(1), 45-52, 2002
- 5) 国土交通省 関東地方整備局 東京外かく環状国道事務所 : 東京外環状線の地質と地下水に関する公表資料
- 6) 川合将文、清水武博、川島眞一 (2007) : 野川上流域における地下水環境と河川水量確保に関する検討、平 19. 都土木技セ年報
- 7) 川合将文、石原成幸、川島眞一、國分邦紀 (2006) : 野川上流域の水文環境の考察、平 18. 都土木技セ年報、131-142
- 8) 東京都土木技術研究所(1990) : 東京都総合地盤図 (Ⅱ) 東京都の地盤 (2) 山の手・北多摩地区
- 9) 建設産業調査会(1998) : 地下水ハンドブック
- 10) 東京都環境局(2014) : 平成 24 年 都内の地下水揚水の実態 (水量調査報告書)
- 11) 東京都環境局(2015) : 平成 25 年 都内の地下水揚水の実態 (水量調査報告書)
- 12) 東京都土木技術支援・人材育成センター(2014) : 平成 25 年地盤沈下調査報告書
- 13) 古野邦雄、香川淳、笠原豊、下平明利、山本真理(2008) : 関東地下水盆の 2008 年の地下水位、平 20. 千葉県環境研究センター年報