

平成 28 年度 (2016 年度) 修士論文

**GETFLOWS を用いた
武蔵野台地における
地下水流動シミュレーション**

平成 29 年 3 月

首都大学東京大学院 都市環境科学研究科

都市基盤環境学域

15885416 大崎 友輔

(指導教授 河村 明)

GETFLOWS を用いた武蔵野台地における地下水流動シミュレーション

学修番号 15885416 大崎 友輔
都市基盤環境学域 環境システム分野
指導教授 河村 明

1. 序論

武蔵野台地に存在する野川等の都市中小河川では、河川の水涸れが発生している¹⁾。この原因の一つに、周辺地域での上水道水源を目的とした揚水(以下「水道揚水」と記す)により地下水位が低下していることが挙げられている。これらの原因等を見るために東京都がとりまとめた武蔵野台地における水循環解析(以下「武蔵野台地調査」と記す)では、対象地域の表流水・地下水を包括した総合的な水循環機構が明らかとなった。本研究では、武蔵野台地調査を参考にして、入力値に現況データを用いたケースと全ての水道揚水が停止したケースの定常解析結果を比較することで、水道揚水停止が地下水位へ与える影響を定量的に検証し、その原因と河川の水涸れへの緩和効果について考察を行った。

2. 解析概要および手法について

2.1 解析領域の概要

図-1 に、表土を除いた三次元水理地質構造モデルを示す。本研究では、入間川・荒川・多摩川に囲まれた 2,000km² の範囲を解析領域とし、表層情報から地下地質構造までを一体に反映した武蔵野台地モデルを作成した。今回、これら河川の湧出高や河川域の表流水深を可視化することで、水道揚水が河川の水涸れへ与える影響について解明を試みた。

2.2 入力に用いたデータ

(1) 有効降水量

メッシュ平年値図 2010 より、1km メッシュの空間分布データの降水量・気温データから有効降水量を算出し、定常の入力値に採用した。

(2) 雨水排水・下水処理場

本解析では下水処理区域における降水量の 20% は地下へ浸透しない損失雨量となったと仮定し、各メッシュの降水量から差し引いた。

(3) 地下水揚水量

表-1 に各ケースの揚水量を抜粋して示す。2012(平成 24)・2013(平成 25)年の東京都・埼玉県の自治体別揚水量を使用し、深度 100m 以深に分布する東京層等から自治体ごとに一様に取水すると想定した。

本研究では表-1 に示した通り、現況揚水量を入力値とする『現況再現ケース (A)』と、水道揚水 (B) が全停止した場合を想定した『水道揚水停止ケース (A-B)』の 2 種類の揚水量データを作成し、他の条件を変えずにケース毎に定常解析を行い、地下水位の解析結果を比較した。

2.3 解析手法の概要

解析には統合型地圏水循環シミュレータ GETFLOWS を採用した。これは陸域での表流水と地下水を一体的に解析でき、任意形状に格子により地表地形・地下地層分布形状を実態に沿って適切にモデル化することが可能なためである。

3. 地下水位の解析結果

3.1 現況再現ケースの解析値と実測値の比較

実測された地下水位には、2012(平成 24)・2013(平成 25)年に東京都・埼玉県の解析領域内 92 井(東京 70 井、埼玉 22 井)の観測井毎の経年平均値を用いた。解析値と実測値を比較した結果、値の差が 8 割以上の地点で±10m 以内に収まっており、2 つの値の決定係数が 0.945 と高いことから、現況の地下水環境を高い精度で再現出来たことが分かる。

3.2 現況再現ケースと水道揚水停止ケースの比較

図-2 に、水道揚水の全停止による現況からの地下水位上昇高を示す。同図より、3m 以上上昇する地域は東京都の北多摩地域及び西多摩の一部地域に集中し、その中でも羽村市・福生市・昭島市を中心に平均 20m 以上の地下水位上昇が見込まれることが分かった。以後、この地下水位上昇の原因と水涸れ河川や表流水へ与える影響について考察を試みた。

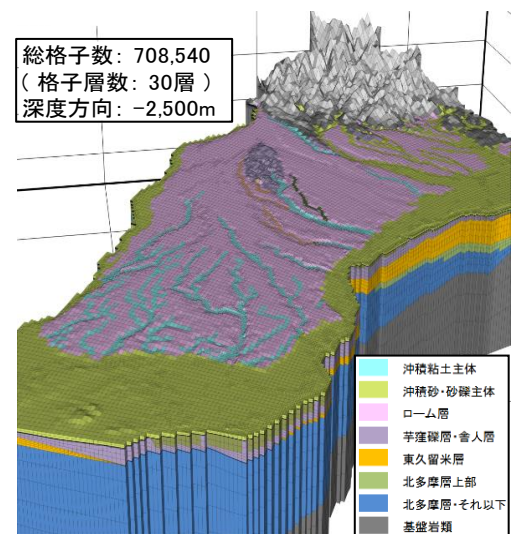


図-1 武蔵野台地モデル(表土除く)

表-1 入力揚水量(抜粋)

(mm/day)	現況再現ケース (A)	水道揚水 (B)	水道揚水停止ケース (A-B)
東京都			
千代田区	0.141	0.000	0.141
練馬区	0.198	0.042	0.156
立川市	0.590	0.507	0.083
府中市	1.719	0.980	0.739
武蔵野市	3.875	3.494	0.381
羽村市	2.512	1.966	0.546
昭島市	2.300	1.992	0.308
埼玉県			
和光市	0.945	0.473	0.472
所沢市	0.220	0.110	0.110
川越市	0.403	0.202	0.201
ふじみ野市	1.386	0.694	0.692
東松山市	0.152	0.116	0.036

4. 考察

4.1 地下水位上昇原因の考察

図-3 に水道揚水量を示す。図-2 において大きな地下水位上昇があった地域を見ると、水道揚水が他の地域に比べて多いことが分かる。更に、水道揚水が多い自治体に近接する地域でも同様の地下水位が上昇したことが見て取れる。

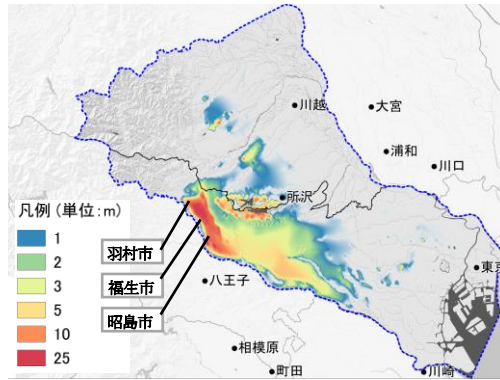


図-2 水道揚水停止による地下水位上昇高

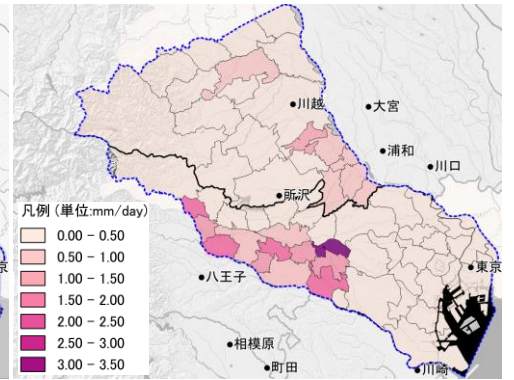


図-3 自治体別の水道揚水量

図-4 に、実際の揚水が多い深度 150m を出発点とした各ケースでの流跡線を示す。図-3 の水道揚水が多い地域に着目すると、図-4 a) の流跡線は周辺の地下水を引き寄せて揚水していることが読み取れる。一方、図-4 b) の流跡線はほぼ歪むことなく伏流して河川や海へ流出している。以上の

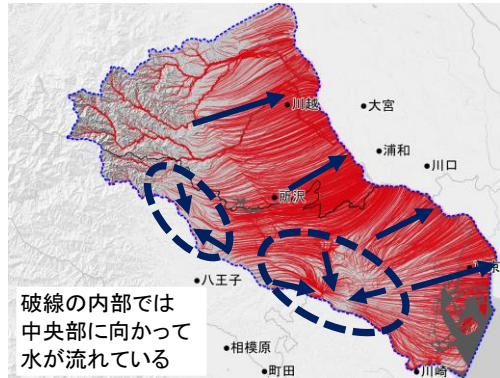


図-4 a) 現況再現ケースの流跡線



図-4 b) 水道揚水停止ケースの流跡線

ことから、水道揚水の停止に伴って揚水されていた周辺の地下水がそのまま流下するようになったため、水道揚水が多い自治体周辺を含めた広域の地下水位が上昇する結果になったと考えられる。

4.2 水涸れ河川への影響考察

図-5 に、各ケースの湧出高分布を示す。両者の比較から、野川・残堀川等の河川で水道揚水停止により湧出高が増加していることが分かる。これは図-2 より、地下水位の上昇に伴って河川への湧出水が増加したものと考えられる。

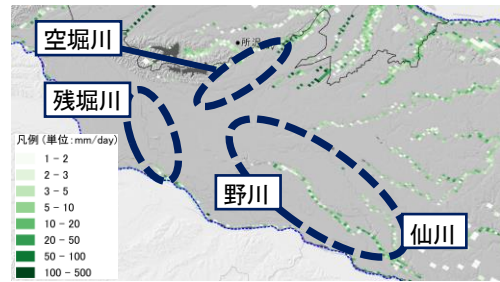


図-5 a) 現況再現ケースの湧出高

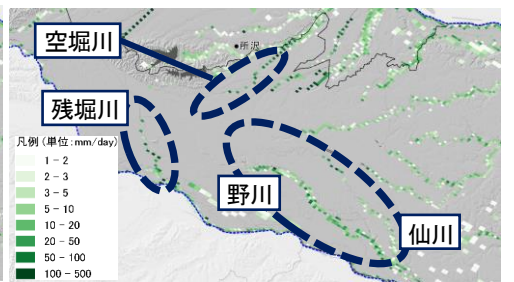


図-5 b) 水道揚水停止ケースの湧出高

図-6 に、各ケースの表流水深分布を示す。両者の比較から、野川等の水涸れが発生しやすい多摩地域の河川や、神田川等の自然流量が少ない区部の河川において、水道揚水停止による表流水の増加が読み取れる。これは図-4 より、河川への湧出水が増加したことに伴って表流水が増加したためと考えられる。以上の結果から、水道揚水停止により武蔵野台地上の中小河川で水涸れが緩和されることが示唆された。

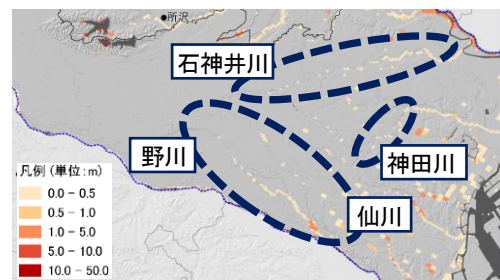


図-6 a) 現況再現ケースの表流水深

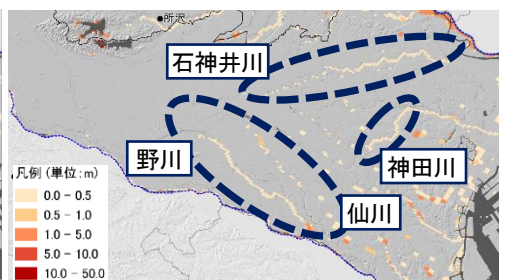


図-6 b) 水道揚水停止ケースの表流水深

5. 結論

本研究では武蔵野台地調査に関して、現況の地下水位状態を高い精度で再現した。更に新たに解析した水道揚水を全停止したケースでは、水道揚水が地下水位へ与える影響を定量的に評価し、水道揚水停止が河川の水涸れ緩和に極めて有効な可能性が示唆された。今後は解析モデルや設定条件の改良を進め、より実社会に即した解析を行うことで、都市部が抱える水環境の課題に対する解決策を明らかにしていきたい。

参考文献

- 1) 川合将文ほか：「河川の水量確保等に関する検討」の成果と課題，都土木技術支援・人材育成センター年報，pp.115-132，2014。

目 次

第1章 序論

1-1 本研究の概要.....	1
1-2 本研究の構成.....	2

第2章 解析概要および手法について

2-1 解析領域の概要.....	3
(1)解析領域の範囲.....	3
(2)平面分割格子.....	5
(3)標高および土地利用データ.....	6
(4)解析領域の地下地層.....	9
(5)武蔵野台地上の水量が少ない代表的な河川の概要.....	15
2-2 入力に用いたデータ.....	17
(1)有効降水量.....	17
(2)雨水排水・下水処理場.....	20
(3)地下水揚水量.....	21
2-3 解析手法の概要.....	26
(1)解析手法について.....	26
(2)水循環解析の支配方程式.....	27
(3)格子システムの基本構成.....	29
(4)解析の時間変化パターン.....	31

第3章 地下水位の解析結果

3-1 現況再現ケース解析値と実測値の比較.....	32
3-2 現況再現ケースと水道揚水停止ケースの比較.....	35

第4章 考察

3-1 地下水位上昇原因の考察.....	38
3-2 水涸れ河川への影響考察.....	42

第5章 結論.....	48
-------------	----

参考文献	49
謝辞	52
付 録	53
・ 武蔵野台地の地下水に関する歴史的背景	

第 1 章

序論

第1章 序論

1-1 本研究の概要

武蔵野台地に存在する野川・仙川・残堀川・空堀川といった都市中小河川では、少雨期に表流水が無くなる水涸れ現象が発生している¹⁾。この原因として、流域の都市化による不浸透域の拡大、下水道整備による家庭排水の減少などと並び、周辺地域における上水道水源を目的とした揚水(以下「水道揚水」と記す)を主とした地下水の過剰な汲み上げを行った結果地下水位が低下し、これに伴って河川への湧出水が減少していることが指摘されている²⁾。

このような水環境課題の実態を探る手法の一つに、実際の観測データや諸元を用いてコンピュータ上に仮想のモデルを作成し、物理法則に従って水の挙動を再現する、水循環シミュレーション解析がある。これは武蔵野台地やその一部に対しても複数の研究が行なわれており、高精度な現況再現から将来の水環境予測まで、多くの成果を挙げている³⁾⁻¹²⁾。加えて、近年の複雑化する地下水環境を鑑み、水循環基本法¹³⁾(2014(平成26)年)では地下水を「公共性の高い国民共有の財産」と定め、翌年の水循環基本計画¹⁴⁾(2015(平成27)年)では「持続可能な地下水の保全と利用の推進」を行うことを明文化した。この流れに続く形で、東京都の地下水対策検討委員会は『これからの地下水保全と適正利用に関する検討について⁴⁾』(2016(平成28)年)を公表し、地下水の「保全と適正な利用」をテーマとして、地下水揚水モニタリングや広域的な地下水連動の分析を行っていく必要があることを提示した。このような背景を基に東京都がとりまとめた武蔵野台地における水循環解析調査(以下「武蔵野台地調査」と記す)では、対象地域の表流水・地下水を包括した総合的な水循環機構を、高い精度で明らかにした¹⁵⁾。しかしながら、武蔵野台地調査では用途別の揚水量に着目して揚水条件を変化させ、地下水や水涸れ河川への影響を検証した解析は行っていない。また、同調査には揚水量等の一部入力値に利用制限のあるデータが用いられているため、そのまま解析結果を比較検証に用いることは出来ない。

そこで本研究では、武蔵野台地調査を参考にして、株式会社地圏環境テクノロジーの開発した統合型地圏水循環シミュレータであるGETFLOWS(GEneral purpose Terrestrial fluid-FLOW Simulator)を用いた解析を行った。まず、全ての入力値に公開データを用いた現況再現ケースを作成し、入力値を一定にした定常解析条件下での地下水位解析結果と実際の地下水位観測値を比較することで、地下水位の再現性を検証した。加えて、水道揚水を全て停止したケースで定常解析を新たに実行し、現況再現ケースの解析結果と比較することで、水道揚水が地下水位へ与える影響を定量的に検証し、その原因と河川の水涸れへの緩和効果を考察した。

1-2 本研究の構成

本研究の構成は以下の通りである。

第2章は「解析概要および手法について」であり、解析領域の概要、入力に用いたデータの内容と今回解析するケースの説明、解析手法の概要に関してそれぞれ説明する。

第3章は「地下水位の解析結果」であり、現況再現ケースの解析地下水位と実際の観測地下水位を比較することで、地下水位環境が再現できたかを検証する。そして現況再現ケースと水道揚水停止ケースの解析地下水位を比較することで、水道揚水を停止することにより地下水位がどの程度上昇するかを定量的に示す。

第4章は「考察」であり、前述の地下水位が上昇した原因、地下水位上昇による水涸れ河川への影響について可視化したGISデータより考察する。

第5章は「結論」であり、研究を通して得られた知見をまとめると共に、今後の展望について述べる。

第2章

解析概要および手法について

第2章 解析概要および手法について

2-1 解析領域の概要

(1) 解析領域の範囲

図 2-1 に、解析対象とする範囲を平面図で示す。本研究では、南東側を東京湾、北東側を荒川、南西側を多摩川、北西側を入間川およびその支流に囲まれた約 2,000km² の範囲を解析領域とした。自治体では、多摩川および荒川に挟まれた東京都と埼玉県の一部にあたる。

図 2-2 に、境界条件について示す。境界条件については、資料^{15),17)}を基に地形および地下水位や河川流量との整合性から設定した。北西側は唐子橋地点を河川の流入境界として水文水質データベースでの実測データ¹⁸⁾から定常値を入力し、それ以外は閉境界とした。図 2-3 に、唐子橋での月単位流量観測データを記す。南西側は一部(図 2-2 の A 部分)が定圧境界(地下水位を 60~80m で固定)とし、他の部分は閉境界(非流出・不浸透境界)とした。北東側および南東側は定圧境界(地下水位 0m で固定)とした。

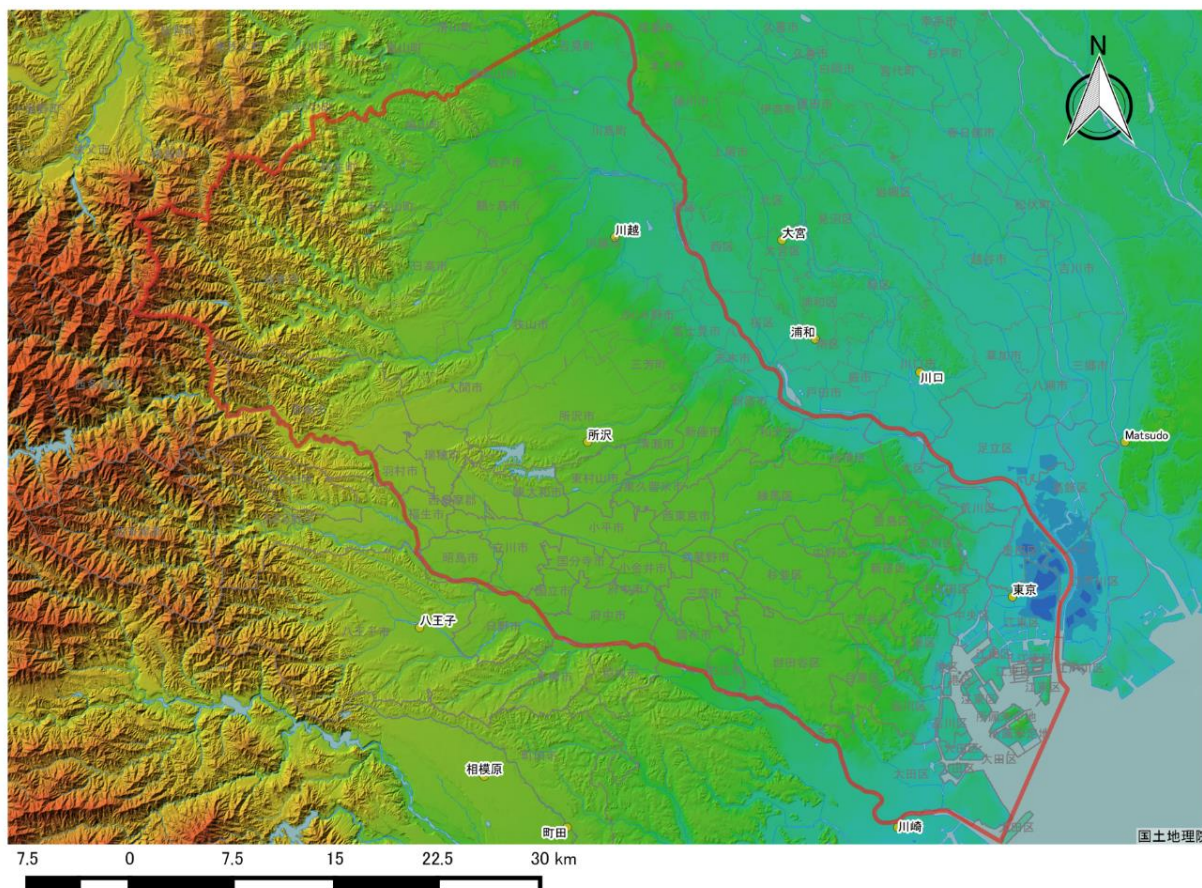


図 2-1 解析領域平面図

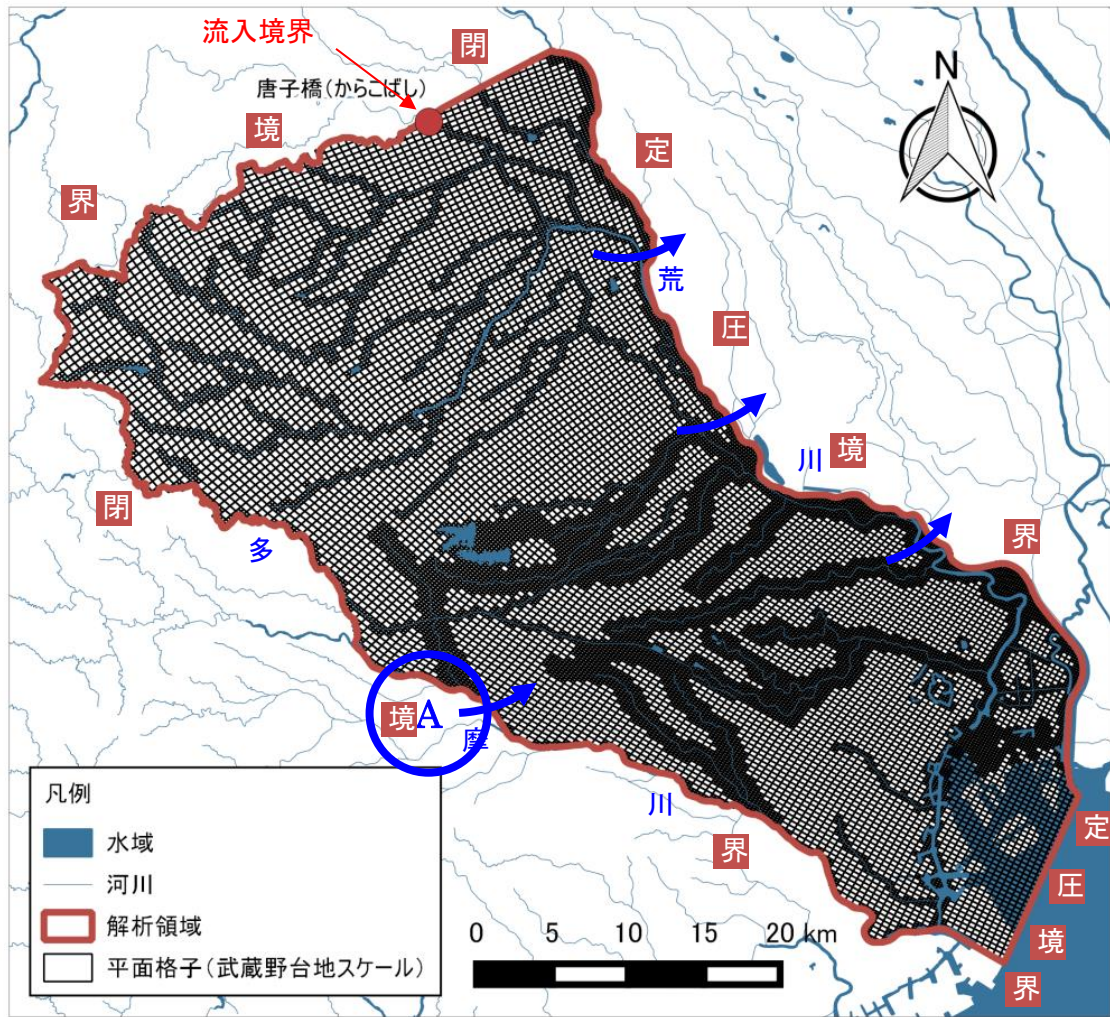


図 2-2 境界条件

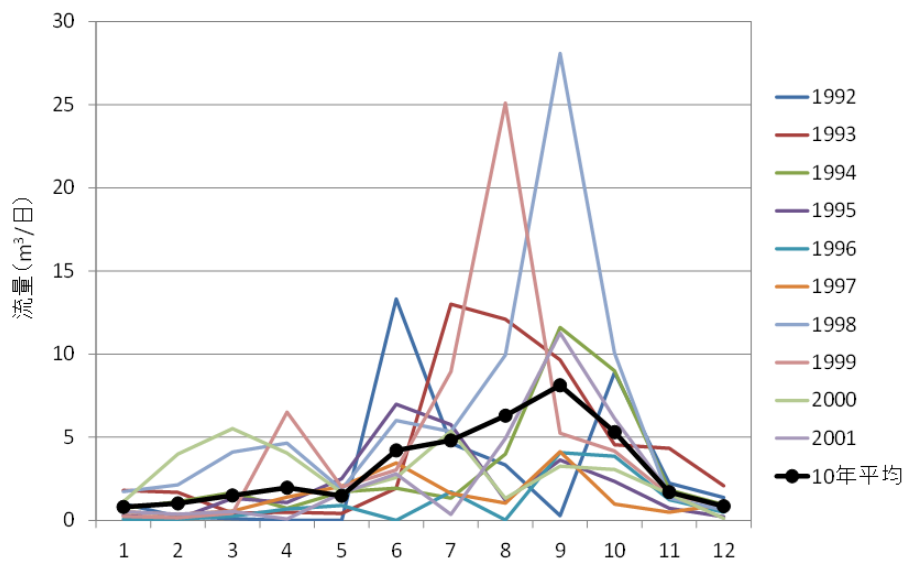


図 2-3 唐子橋地点の月流量観測データ (1992年～2001年)

(2) 平面格子分割

図 2-4 に、北多摩地域の一部において平面格子分割を行ったモデル(以下「平面格子システム」と記す)を示す。赤枠内は空堀川周辺の局所的に細分化した地域を拡大したものである。モデル化を行うにあたり、地形起伏、地質分布等を考慮し、対象領域の平面格子分割を行った。水平分解能(平面格子の大きさ)は場所によって粗密を与え、河道とその周辺における格子分割を細密にし、河道から離れた山地斜面ほど粗く格子分割を行った。河道付近をそれ以外の平面格子より四分割した格子で構成した結果、平面格子の総数は 23,618 となった。

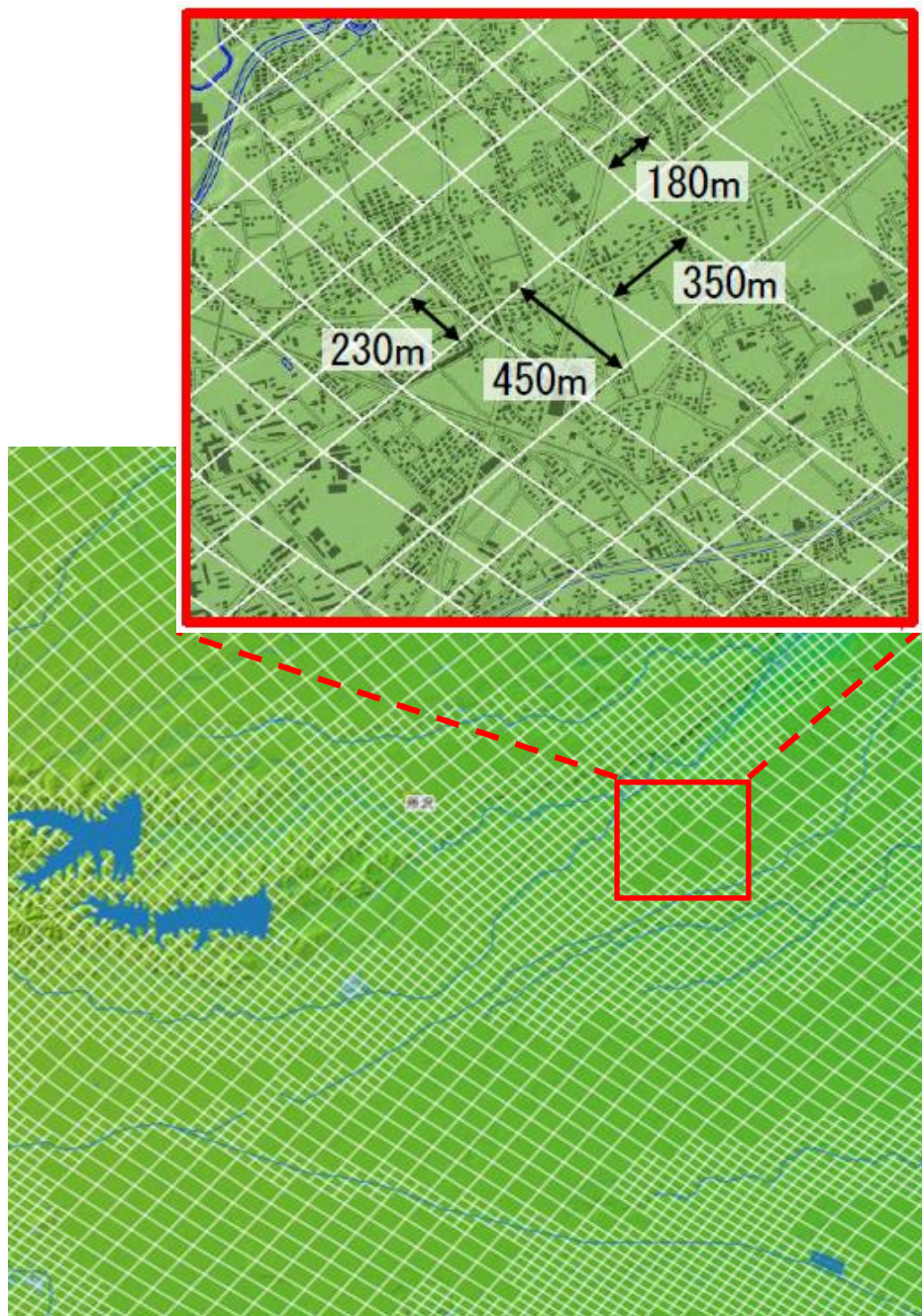


図 2-4 平面格子システム

(3) 標高および土地利用データ

図 2-5 に、標高を反映した三次元格子モデル鳥瞰図を示す。解析対象とする範囲の地形には陸域と水域の両方が含まれる。河川底や湖底を除く陸域の地形は国土地理院の基盤地図情報¹⁹⁾の 5m メッシュ DEM(2013 年版)・10m メッシュ DEM(2008 年版)および国土地理院数値地図の 50m メッシュ DEM(2001 年版)を用いた。一方で、これらの地形データに河床や湖底等の水域地形は含まれていないため、河床については東京都の各河川整備計画¹⁾の既往資料に河床標高値の詳しい記載があるものはそれらを反映した。河床データの得られていない河川については、5m メッシュ地形(標高)データより堤内の微地形から滲筋を判読し、隣接する河川敷の地盤高より約 3m 掘り下げた。また、対象領域内の湖沼は狭山湖(山口ダム)、多摩湖(村山ダム)が含まれるが湖底標高は不明である。ここでは、堤防高(山口ダム 33.5m、村山ダム約 32.6m)を目安に堤防天端と湖底の標高差が 30m となるよう湖底を掘り下げてモデル化し、モデル全域の標高を設定した。

図 2-6 に、土地利用細分メッシュを示す。土地利用は、国土交通省国土数値情報¹⁹⁾の土地利用細分メッシュデータ(100m)の 2009 年版を収集した。土地利用の種類は、田、その他農用地、森林、荒地、建物用地、道路、鉄道、その他の用地、河川および湖沼、海浜、海水域、ゴルフ場の 12 種類とした。同図より、解析領域のおよそ半分が建物用地となっていることが分かる。

表 2-1 に、土地利用区分ごとのマンニングの粗度係数について記す。本研究では建設省河川砂防技術基準案同解説調査編²⁰⁾を基に、これら土地利用区分ごとにマンニングの粗度係数を定めた。解析においては、各格子のメッシュに含まれる土地利用区分の面積で除した粗度係数を算出し割り当てた。

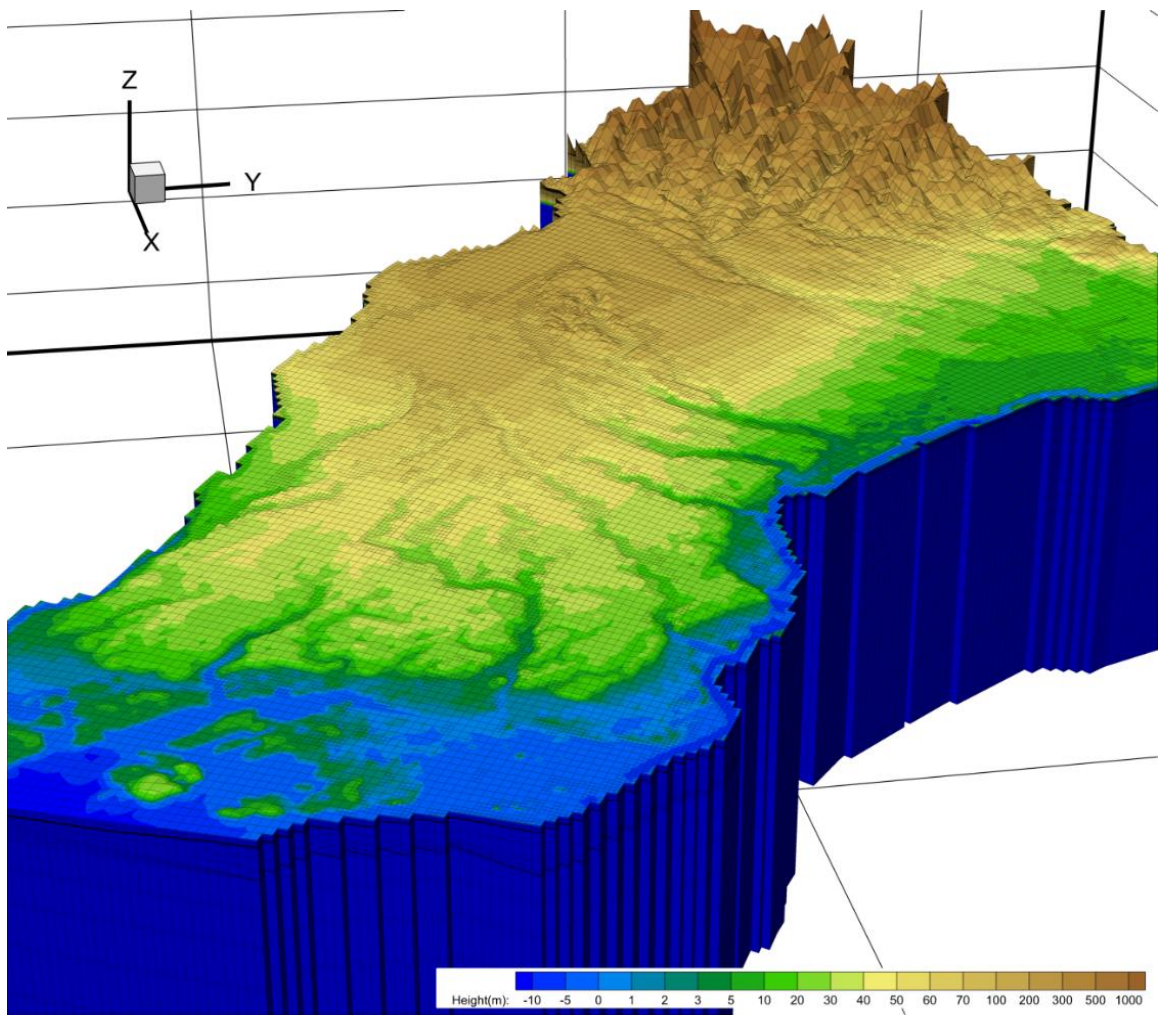


図 2-5 三次元格子モデル鳥瞰図 (標高)

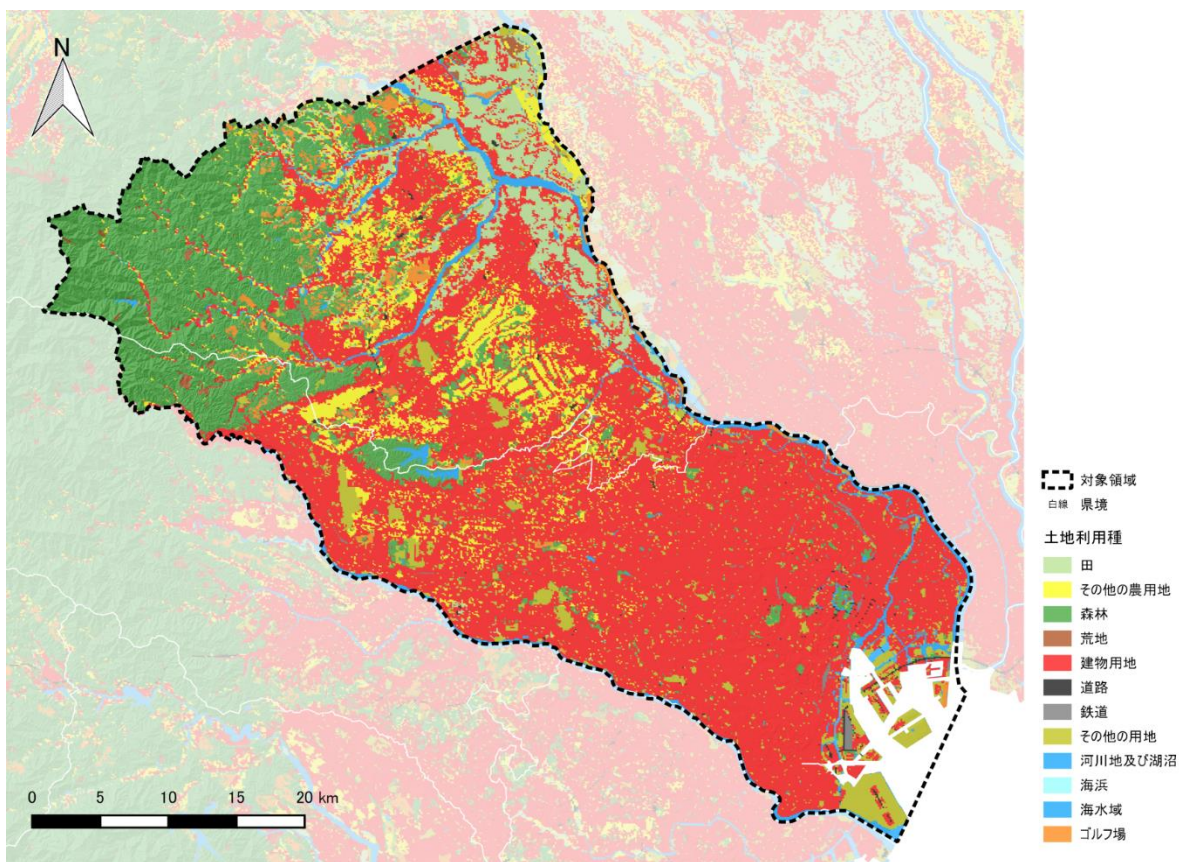


図 2-6 土地利用細分メッシュ

表 2-1 土地利用区分ごとのマンニングの粗度係数

土地利用区分	等価粗度係数 ($m^{-1/3} \cdot s$)
水田	0.6
その他農用地	0.2
森林	0.4
荒地	0.1
建物用地	0.05
幹線交通用地	0.05
その他用地	0.1
河川および湖沼	0.02
海浜	0.02
海水域	0.02
ゴルフ場	0.4

(4) 解析領域の地下地層

図 2-7 に地質を反映した三次元格子モデルの鳥瞰図を、図 2-8 に主な深度断面の地質構造を示す。本研究では対象領域の浅層地質を重視したモデルを構築した。地下地層構造は東京都土木技術支援・人材育成センターの地盤ボーリングデータ²¹⁾と解析領域の地盤分野論文²²⁾-²⁸⁾から構造を設定した。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する十分な範囲として標高-2,500m までを対象とした。そして深度方向の格子分割の際には、前述した三次元水理地質構造モデルの各水理地質区分、その分布範囲、基底面等高線や層厚を考慮した。なお三次元モデルを構成する際、モデルは地表付近の浅層地質を重視し、深度方向の格子分割数は浅層を細密に、深さ方向に次第に粗くなるよう分割した。結果、格子層数は 30、三次元格子の総数は 708,540 となった。表 2-2 にモデル化した地質区分について示す。

表 2-3 に解析に使用した有効間隙率と透水係数について、図 2-9 に相対浸透率曲線について、図 2-10 に毛管圧力曲線について示す。有効間隙率と透水係数は、東京都土木技術支援・人材育成センター研究成果²⁾や東京都総合地盤図²²⁾を基にして地下水位や河川流量との整合性を確保したうえで決定した。また、相対浸透率と毛細管圧力については、対象地域に固有のパラメータを取得することが困難であったため、地盤中の水相・空気相の相互作用の一般的な定性傾向を考慮した非線形関数を用いることとした。

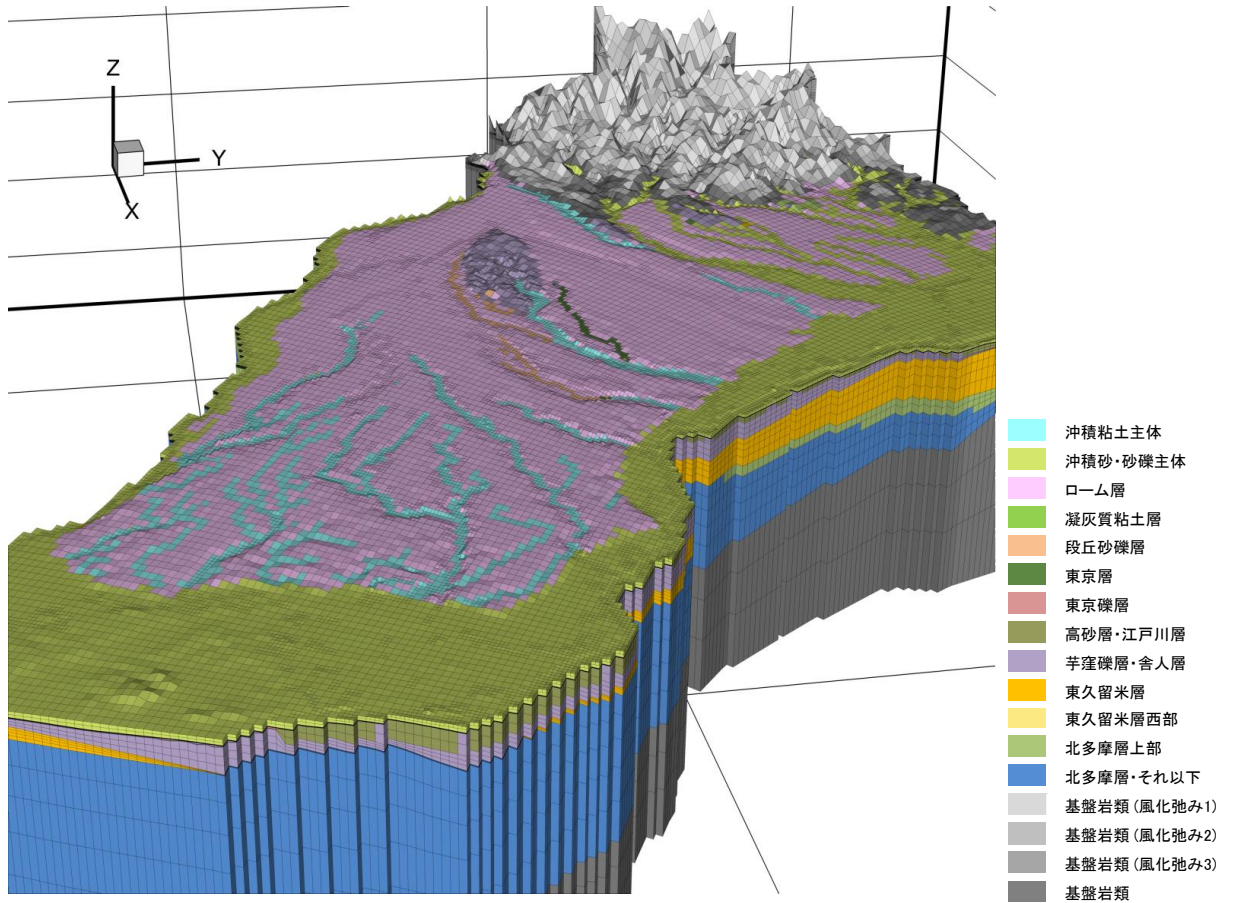


図 2-7 三次元格子モデル鳥瞰図 (地質)

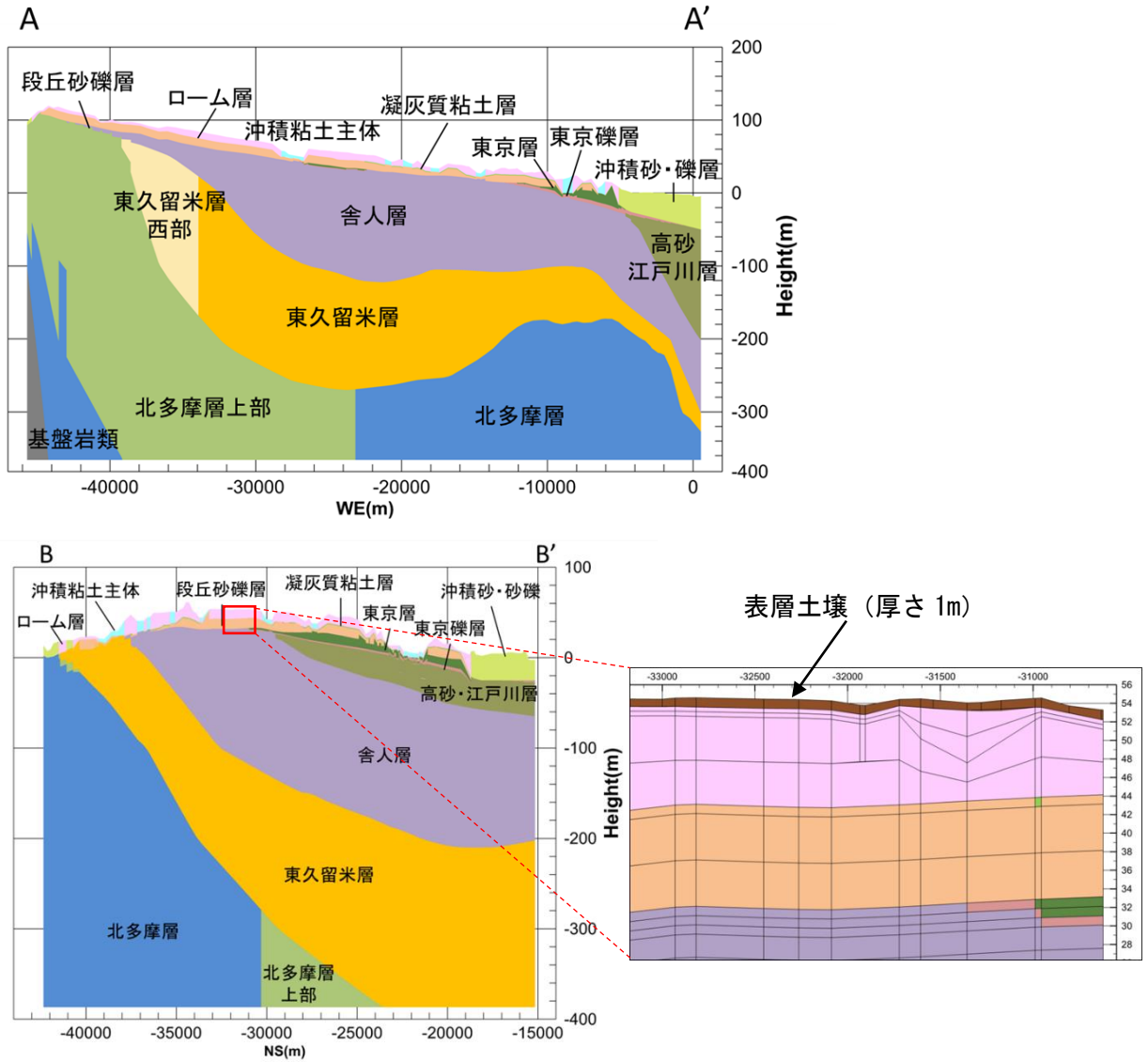
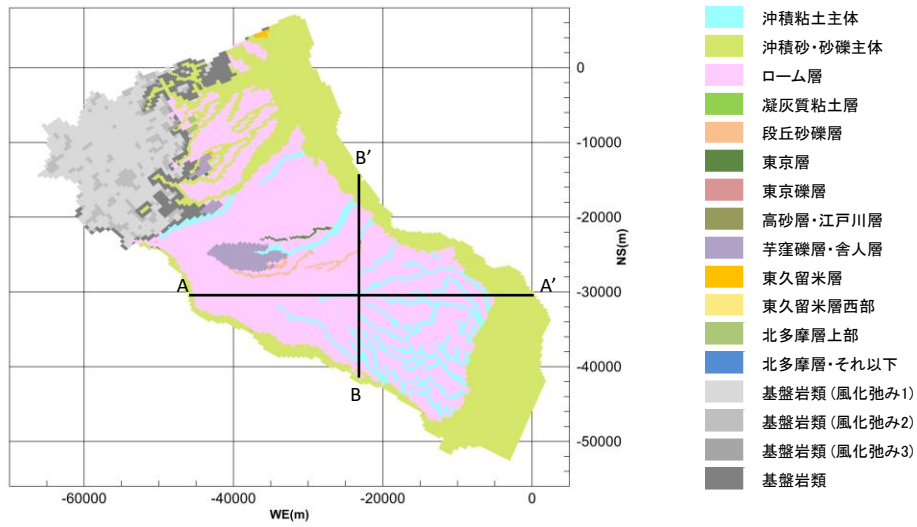


図 2-8 主な深度断面の地質構造

表 2-2 モデル化した地質区分

大区分	区分	記号	備考
表土	表土	TS	高い透水性をもつ 領域全体に厚さ 1m で分布
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 ～ 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・舎人層・	TN	情報少ない。段丘砂礫層の最低値が近い。 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

表 2-3 地質区分別の有効間隙率と透水係数

年代	地質区分	記号	有効間隙率 (%)	透水係数 (cm/s)		
第四紀	完新世	表土	TS	40	1×10^{-2}	
		沖積層	AC	30	1×10^{-4}	
			AS	30	H: 1×10^{-2} V: 1×10^{-3}	
	更新世	ローム層 段丘礫層	LM	20	5×10^{-3}	
		凝灰質 粘土層	TC	20	1×10^{-7}	
		東京層群	TOS	30	H: 1×10^{-4} V: 1×10^{-5}	
			TOG	30	1×10^{-2}	
			TE	30	H: 1×10^{-3} V: 1×10^{-5}	
	第三紀	鮮新世	上総層	TN	20	H: 1×10^{-2} V: 1.5×10^{-6}
				HG	30	H: 1×10^{-2} V: 5×10^{-6}
HGW			30	H: 1×10^{-4} V: 1×10^{-6}		
KTs			20	H: 3×10^{-3} V: 1×10^{-5}		
KT			20	H: 3×10^{-4} V: 1×10^{-6}		
基盤岩類			BR	0.5	1×10^{-8}	

※ H: 水平方向, V: 鉛直方向

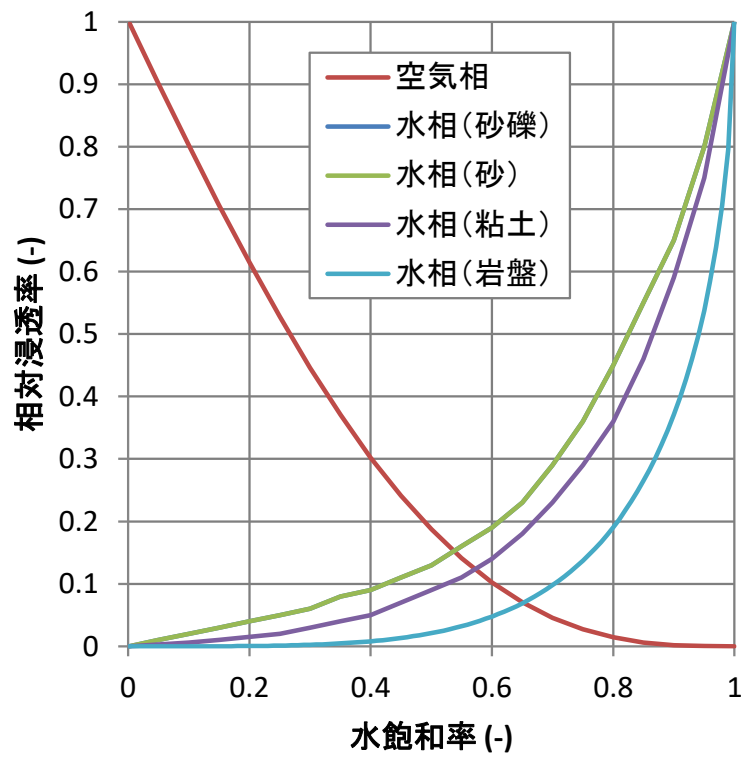


图 2-9 相对渗透率曲线

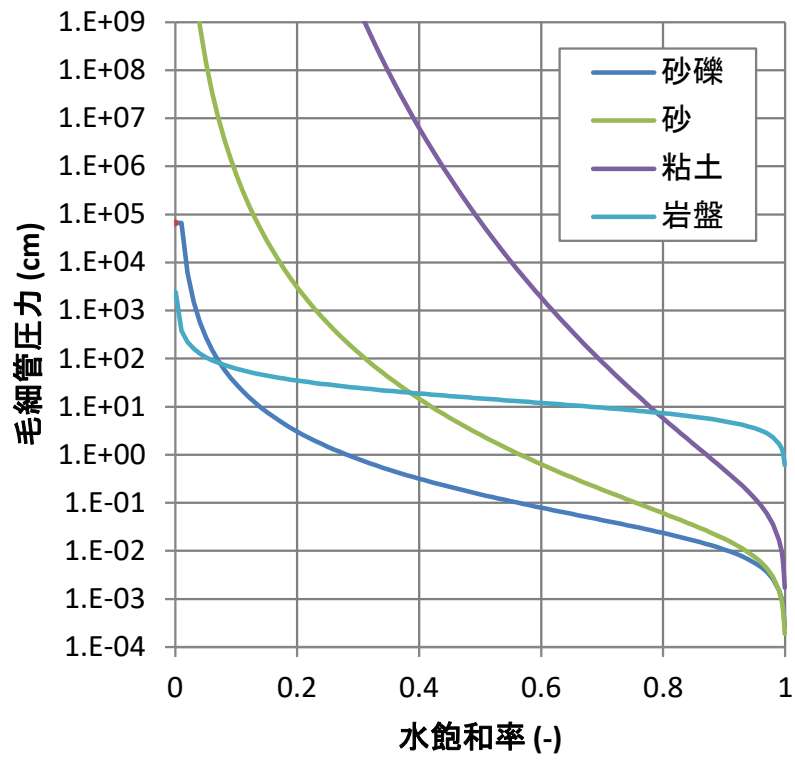


图 2-10 毛管压力曲线

(5) 武蔵野台地上の水量が少ない代表的な河川の概要

a) 残堀川

多摩川水系。瑞穂町の狭山池に源を発し、日野橋上流で多摩川に流入する。上流部においては狭山池や狭山丘陵を水源とする支川の流入はあるものの、中流部では支線や湧出水の流入がほとんど無く、滝口に至るまで水量が極めて少ない。特に11～5月の期間は、武蔵村山市の新残堀橋から滝口まで水涸れが著しい。東京都建設局は維持流量を確保するため、設置可能な区間で河床に不透水層を設置している^{1),14)}。

b) 空堀川

荒川水系(柳瀬川支川)。武蔵村山市の野山北公園付近に源を発し、東大和市高木で奈良橋川と合流、清瀬市中里付近で柳瀬川に流入する。柳瀬川や奈良橋川と比較して固有の水源が少なく、河床材料も砂礫が多いため、表流水が地下へ浸透しやすい。そのため冬季を中心に無降雨期が続くと、下流域を中心に水涸れが発生しやすい^{1),14),29)}。

c) 野川

多摩川水系。国分寺市の大池に源を発し、世田谷区二子玉川付近で多摩川に流入する。上流域～中流域で平常時の表流水が涸れる現象が確認されている。東京都建設局は維持流量を確保するため、設置可能な区間で河床に不透水層を設置する工事を進めている^{1),2),14),30),31)}。

d) 仙川

多摩川水系(野川支川)。小金井市内に源を発し、狛江市東野川付近で入間川と合流、世田谷区鎌田付近で野川に流入する。上流域で平常時の表流水が涸れる現象が確認されている。支川である入間川も全域にわたって水涸れが発生している^{1),2),14),30),31)}。

e) 神田川

荒川水系。三鷹市の井の頭池に源を発し、杉並区と中野区の区界で善福寺川と合流、新宿区下落合一丁目で妙正寺川と合流し、両国橋上流で隅田川に流入する。かつては湧出水が豊富であったが、現在ではかなり減少しており、平常時の表流水は清流復活事業による多摩川上流水再生センターからの高度処理水が多くを占める^{1),14)}。

f) 石神井川

荒川水系。小平市内に源を発し、JR王子駅東側で隅田川へ流入する。上流域で平常時に流量が減少している区間が存在する。東京都建設局は河川の湧出水等の保全や地下構造物への漏出地下水を導入するといった対策をとるとしている¹⁾。

図2-11に、東京都の河川図を示す³²⁾。本研究では、これら河川の湧出高や河川域の表流水深を可視化することで、水道揚水が河川の水涸れへ与える影響について解明を試みた。

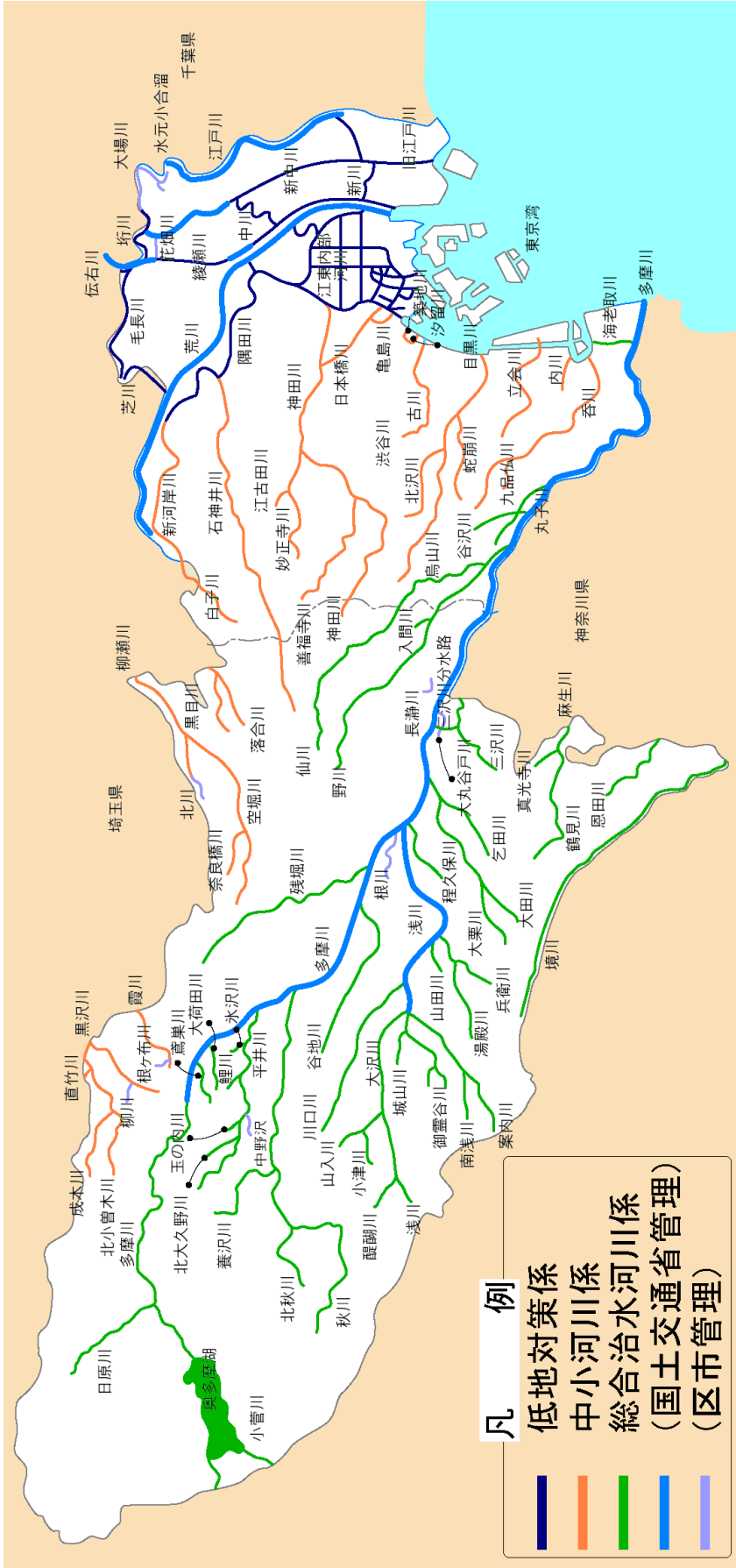


图 2-11 東京都の河川図

2-2 入力に用いたデータ

(1) 有効降水量

図 2-12 に年降水量分布を、図 2-13 に気温分布を示す。降水量・気温データは、気象庁が公開しているメッシュ平年値図 2010 (1981(昭和 56)~2010(平成 22)年の 30 箇年平年値)より 1km メッシュの空間分布データを使用した³³⁾。なお、降水はすべて液体の水であるとし、積雪・融雪の影響は考慮しない。

蒸発散量の算定はハーモン式に基づく可能蒸発散量に従った。ハーモン法による可能蒸発散量は式(2-1)で算定される。

$$E_p = 0.14 D_0^2 p_t \quad (2-1)$$

ここに、 E_p :日平均蒸発散量[mm/day], D_0 :12 時間を 1 に規格化した可照時間[-],
 p_t :飽和絶対湿度[g/m³]

飽和絶対湿度 p_t は理想気体を仮定し、飽和水蒸気圧 e_{sat} (hPa) と温度 T (°C) から式(2-2)によって算出する。

$$p_t = \frac{217 + e_{sat}}{T + 273.15} \quad (2-2)$$

ここに、飽和水蒸気圧 e_{sat} は Lowe の式(3)より求めた。

$$e_{sat} = A_0 + T(A_1 + T(A_2 + T(A_3 + T(A_4 + T(A_5 + A_6 T)))))) \quad (2-3)$$

$$A_0 = 6.107799961$$

$$A_1 = 4.436518521 \times 10^{-1}$$

$$A_2 = 1.428945805 \times 10^{-2}$$

$$A_3 = 2.650648471 \times 10^{-4}$$

$$A_4 = 3.031240396 \times 10^{-6}$$

$$A_5 = 2.034080948 \times 10^{-8}$$

$$A_6 = 6.136820929 \times 10^{-11}$$

また、可照時間 D_0 は表 2-4 に示す北緯に対する補正值に基づく。

本研究では気温データを用いてメッシュごとにハーモン式に基づく可能蒸発散量を算出し、降水量から可能蒸発散量を差し引いた有効降水量を、定常の降水入力値とした。図 2-14 に有効降水量分布を示す。

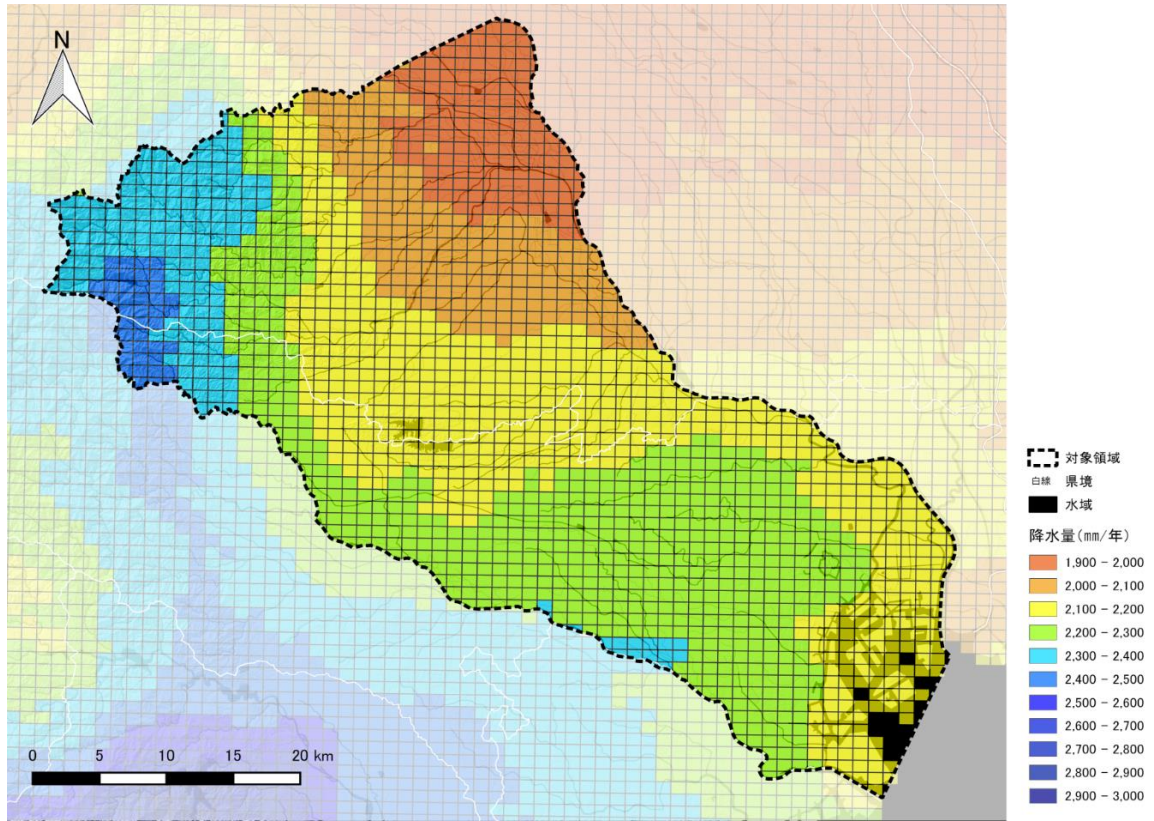


図 2-12 メッシュ平年値 2010 (年降水量)

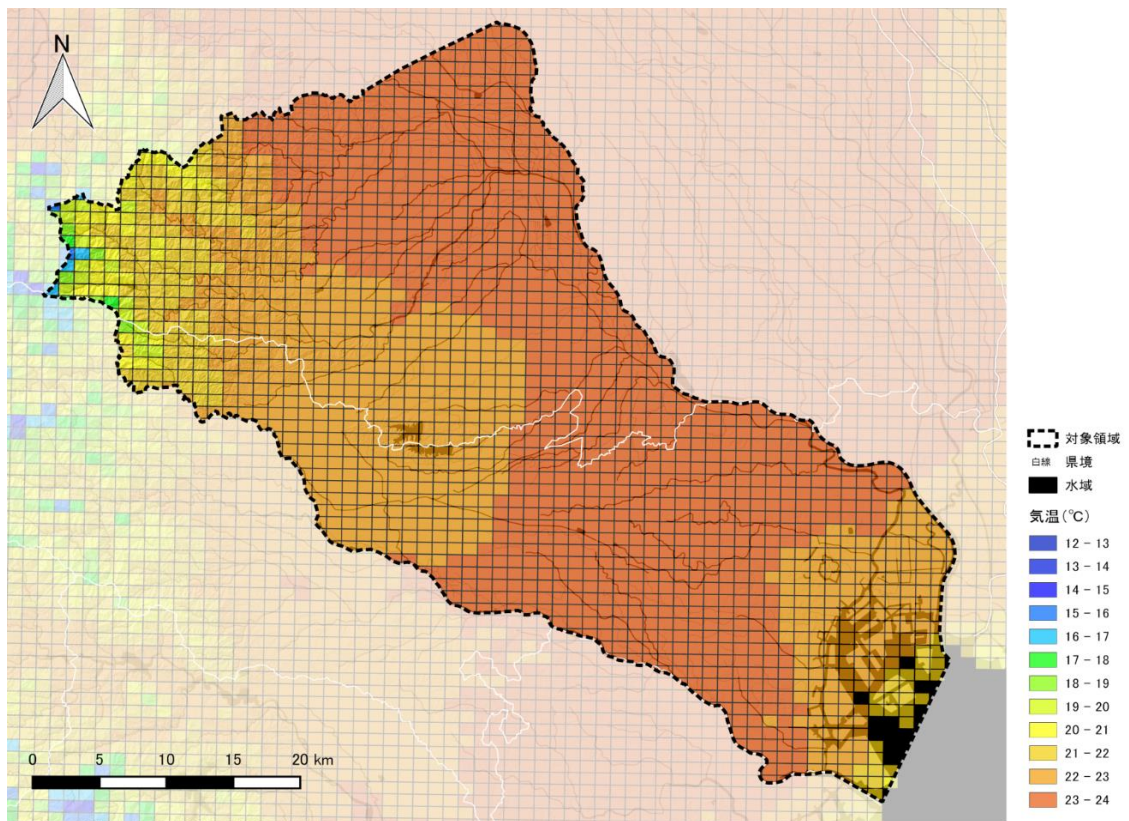


図 2-13 メッシュ平年値 2010 (年平均気温)

表 2-4 可照時間補正值

可照時間 Do (h/12)	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
	0.87	0.85	1.03	1.1	1.21	1.22	1.24	1.16	1.03	0.97	0.86	0.84

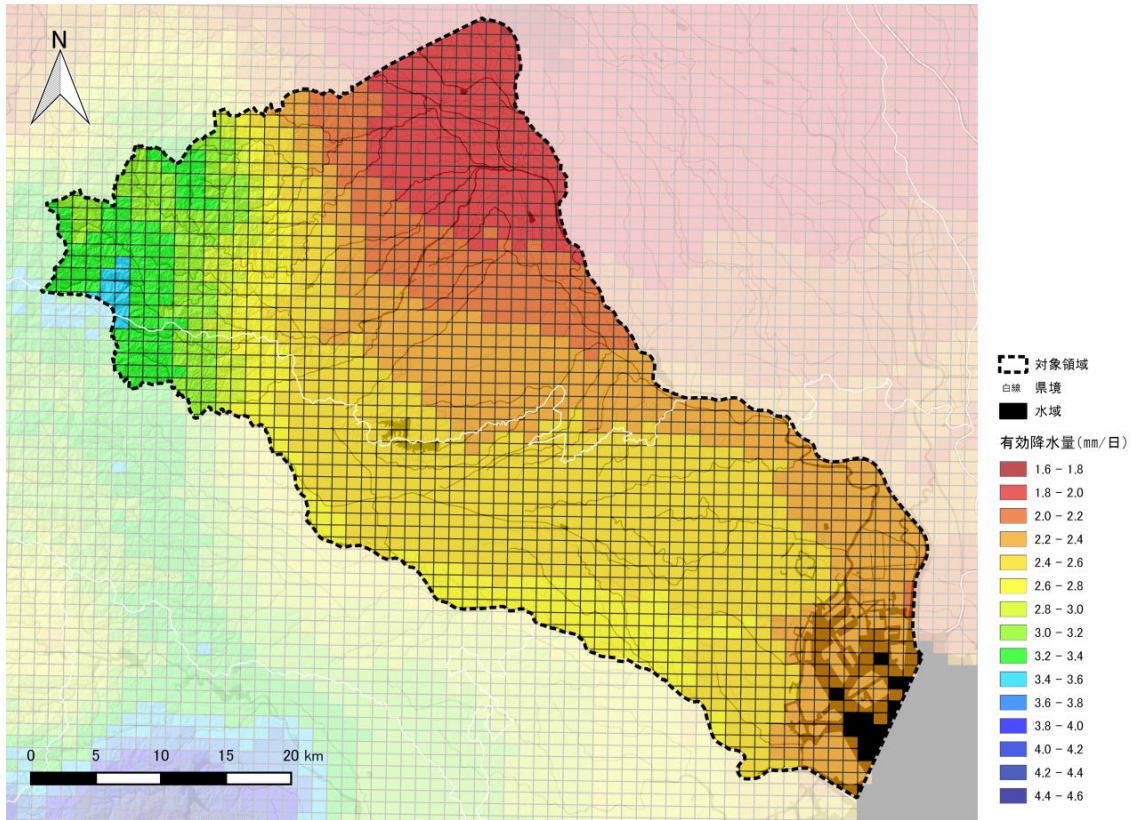


図 2-14 有効降水量分布

(2) 雨水排水・下水処理場

図 2-15 に、解析領域内の下水処理区を示す。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、地下水位や河川流量との整合性等を基に、東京都下水道局³⁴⁾および埼玉県下水道局³⁵⁾の各下水処理区域では、降水量の 20% が損失雨量になったと仮定し、各メッシュの降水量から差し引いたうえで同じ水量を各下水処理場から放流した。なおこの損失雨量の割合は、地下水位、河川流量などの解析結果の再現性を踏まえて適宜見直しを行うものとする。

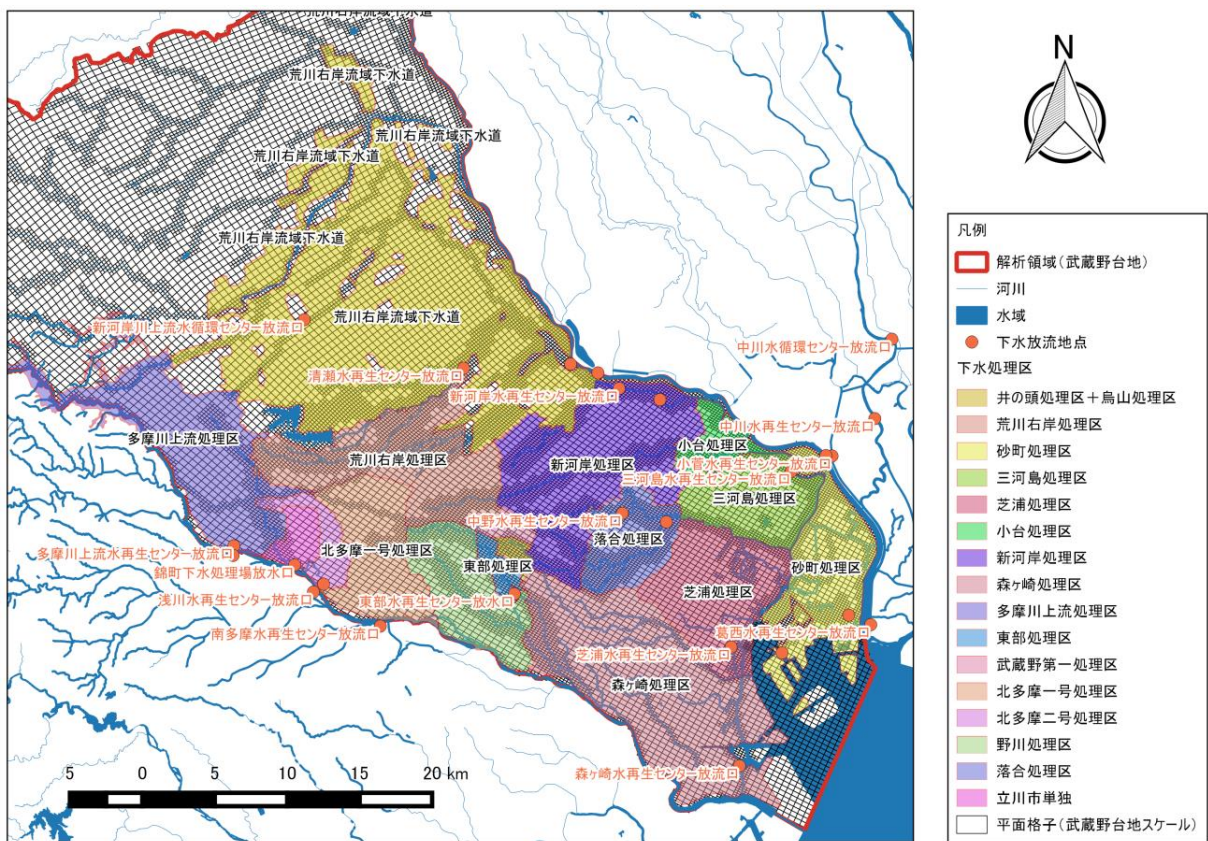


図 2-15 下水処理区および下水放流地点

(3) 地下水揚水量

表 2-5 に、解析領域内の自治体別現況揚水量を示す。本研究で用いた揚水量は、東京都環境局と埼玉県環境部による 2012(平成 24)・2013(平成 25)年の自治体別揚水量を各自治体面積で割った値を使用した^{36),37)}。

深度については、全国地盤環境情報ディレクトリ³⁸⁾によれば、「地下水は、沖積層及び段丘砂礫層中の浅層地下水（不圧地下水）のほか、大部分は東京層群及び上総層群の砂層・砂礫層中にある被圧地下水を採取している」とあり、また、全国地下水資料台帳³⁹⁾の井戸データに基づき井戸深度を集計した国土交通省資料によると、50m-250m の深度で 90%程度を占めており、また深度 100-150m が最も多いことが示されている。このことから本解析では、深度 100m 以深に広く分布する東京層・東京礫層・高砂層・江戸川層・東久留米層の最上層から自治体ごとに一様取水することを基本とした。なお、深度 100m 以深に該当地質が存在せず、上部には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。また、対象とする地層が深度 10m より浅い場合は取水層の対象とせず、10m 以深で最も浅い層から取水した。

表 2-5 現況の揚水量(面積あたり・自治体別)(A)

自治体		揚水量 (mm/day)	自治体	揚水量 (mm/day)			
東京都	区部	千代田区	0.141	埼玉県	西部地域	和光市	0.945
		中央区	0.017			朝霞市	0.969
		港区	0.073			新座市	0.715
		新宿区	0.145			志木市	1.000
		文京区	0.329			富士見市	0.636
		台東区	0.180			ふじみ野市	1.386
		墨田区	0.030			所沢市	0.220
		江東区	0.002			入間市	0.032
		品川区	0.019			狭山市	0.226
		目黒区	0.009			飯能市	0.003
		大田区	0.010			川越市	0.403
		世田谷区	0.011			坂戸市	0.577
		渋谷区	0.029			鶴ヶ島市	0.096
		中野区	0.042			日高市	0.334
		杉並区	0.170			三芳町	0.260
		豊島区	0.134			毛呂山町	0.177
		北区	0.049			越生町	0.000
		荒川区	0.063		比企地域	東松山市	0.152
		板橋区	0.059			川島町	0.073
		練馬区	0.198			吉見町	0.013
	台東区	0.590	小川町	0.000			
	北多摩地域	武蔵野市	3.875	嵐山町		0.000	
		三鷹市	1.749	滑川町		0.000	
		青梅市	0.024	鳩山町		0.015	
		府中市	1.719	ときがわ町		0.000	
		昭島市	2.300				
		調布市	1.732				
		小金井市	1.130				
		小平市	1.022				
		東村山市	0.168				
		国分寺市	1.677				
		国立市	1.338				
		狛江市	0.397				
		東大和市	0.757				
		清瀬市	0.078				
		東久留米市	0.664				
武蔵村山市		0.243					
西東京市	0.535						
西多摩地域	福生市	1.249					
	羽村市	2.512					
	瑞穂町	0.092					

本研究では、水道揚水が地下水位に与える影響をケースごとに判断するため、自治体別の水道揚水量を求める必要がある。今回、東京都は自治体別の水道揚水量データ³⁶⁾を採用し、埼玉県は西部・比企地域の揚水量のうち地域別の水道揚水が占める割合³⁷⁾から算出した。解析では表 2-5 に示した現況揚水量を入力値とする『現況再現ケース(A)』と、水道揚水(B)が全停止した場合を想定した『水道揚水停止ケース(A-B)』(現況揚水量から水道揚水量を差し引いた量)の 2 種類の揚水量データを作成した。

表 2-6 に解析領域内の自治体別水道揚水量を、表 2-7 に解析領域内の水道揚水停止ケースの揚水量を示す。他の条件を変えず揚水量のみが異なる 2 つのケースそれぞれで定常解析を行い、出力された地下水位の解析結果を比較した。

表 2-6 水道揚水量（面積当たり・自治体別）(B)

自治体		揚水量 (mm/day)	自治体		揚水量 (mm/day)			
東京都	区部	千代田区	0.000	埼玉県	西部地域	和光市	0.473	
		中央区	0.000			朝霞市	0.485	
		港区	0.000			新座市	0.358	
		新宿区	0.000			志木市	0.501	
		文京区	0.000			富士見市	0.319	
		台東区	0.000			ふじみ野市	0.694	
		墨田区	0.000			所沢市	0.110	
		江東区	0.000			入間市	0.016	
		品川区	0.000			狭山市	0.113	
		目黒区	0.000			飯能市	0.001	
		大田区	0.000			川越市	0.202	
		世田谷区	0.000			坂戸市	0.289	
		渋谷区	0.000			鶴ヶ島市	0.048	
		中野区	0.000			日高市	0.167	
		杉並区	0.071			三芳町	0.130	
		豊島区	0.000			毛呂山町	0.088	
		北区	0.001			越生町	0.000	
		荒川区	0.000			比企地域	東松山市	0.116
		板橋区	0.000				川島町	0.054
		練馬区	0.042				吉見町	0.010
	台東区	0.507	小川町	0.000				
	武蔵野市	3.494	嵐山町	0.000				
	三鷹市	1.457	滑川町	0.000				
	青梅市	0.000	鳩山町	0.012				
	府中市	0.980	ときがわ町	0.000				
	昭島市	1.992						
	調布市	1.618						
	小金井市	1.056						
	小平市	0.752						
	東村山市	0.001						
	国分寺市	1.559						
	国立市	1.235						
	狛江市	0.315						
東大和市	0.235							
清瀬市	0.000							
東久留米市	0.300							
武蔵村山市	0.147							
西東京市	0.457							
西多摩地域	福生市	1.186						
	羽村市	1.966						
	瑞穂町	0.000						

表 2-7 水道揚水停止ケースの揚水量（面積あたり・自治体別）（㉠－㉢）

自治体		揚水量 (mm/day)	自治体		揚水量 (mm/day)		
東京都	区部	千代田区	0.141	埼玉県	和光市	0.472	
		中央区	0.017		朝霞市	0.484	
		港区	0.073		新座市	0.357	
		新宿区	0.145		志木市	0.499	
		文京区	0.329		富士見市	0.317	
		台東区	0.180		ふじみ野市	0.692	
		墨田区	0.030		所沢市	0.110	
		江東区	0.002		入間市	0.016	
		品川区	0.019		狭山市	0.113	
		目黒区	0.009		飯能市	0.001	
		大田区	0.010		川越市	0.201	
		世田谷区	0.011		坂戸市	0.288	
		渋谷区	0.029		鶴ヶ島市	0.048	
		中野区	0.042		日高市	0.167	
		杉並区	0.099		三芳町	0.130	
		豊島区	0.134		毛呂山町	0.088	
		北区	0.048		越生町	0.000	
		荒川区	0.063		東松山市	0.037	
		板橋区	0.059		川島町	0.019	
		練馬区	0.156		吉見町	0.003	
		台東区	0.083		小川町	0.000	
		北多摩地域	武蔵野市		0.381	嵐山町	0.000
			三鷹市		0.292	滑川町	0.000
	青梅市		0.024	鳩山町	0.004		
	府中市		0.739	ときがわ町	0.000		
	昭島市		0.308				
	調布市		0.114				
	小金井市		0.074				
	小平市		0.270				
	東村山市		0.167				
	国分寺市		0.118				
	国立市		0.103				
	狛江市		0.082				
	東大和市		0.522				
	清瀬市		0.078				
	東久留米市		0.364				
	武蔵村山市		0.096				
	西東京市		0.078				
	西多摩地域	福生市	0.063				
		羽村市	0.546				
		瑞穂町	0.092				

2-3 解析手法の概要

(1) 解析手法について

図 2-16 に、水循環の概念図を示す⁴⁰⁾。同図において、地下水利用にあたる水道揚水が地表の河川の流れへ与える影響を定量的に検証するためには、陸面を介した地上・地下の相互交換挙動を一体化して取り扱う地表水・地下水連成解析手法に基づく水循環シミュレーションを行う必要がある。本研究では、表流水と地下水を一体化した水循環解析を実用的な速度および安定性で行うことが可能であり、実際の地表地形と地下地層分布形状を現状に沿って適切にモデル化することができ、また河川水と地下水の多様な水理諸量(地下水位・湧出高・流跡線・表流水深など)を算出・可視化できる、統合型地圏水環境シミュレータ GETFLOWS を採用した。

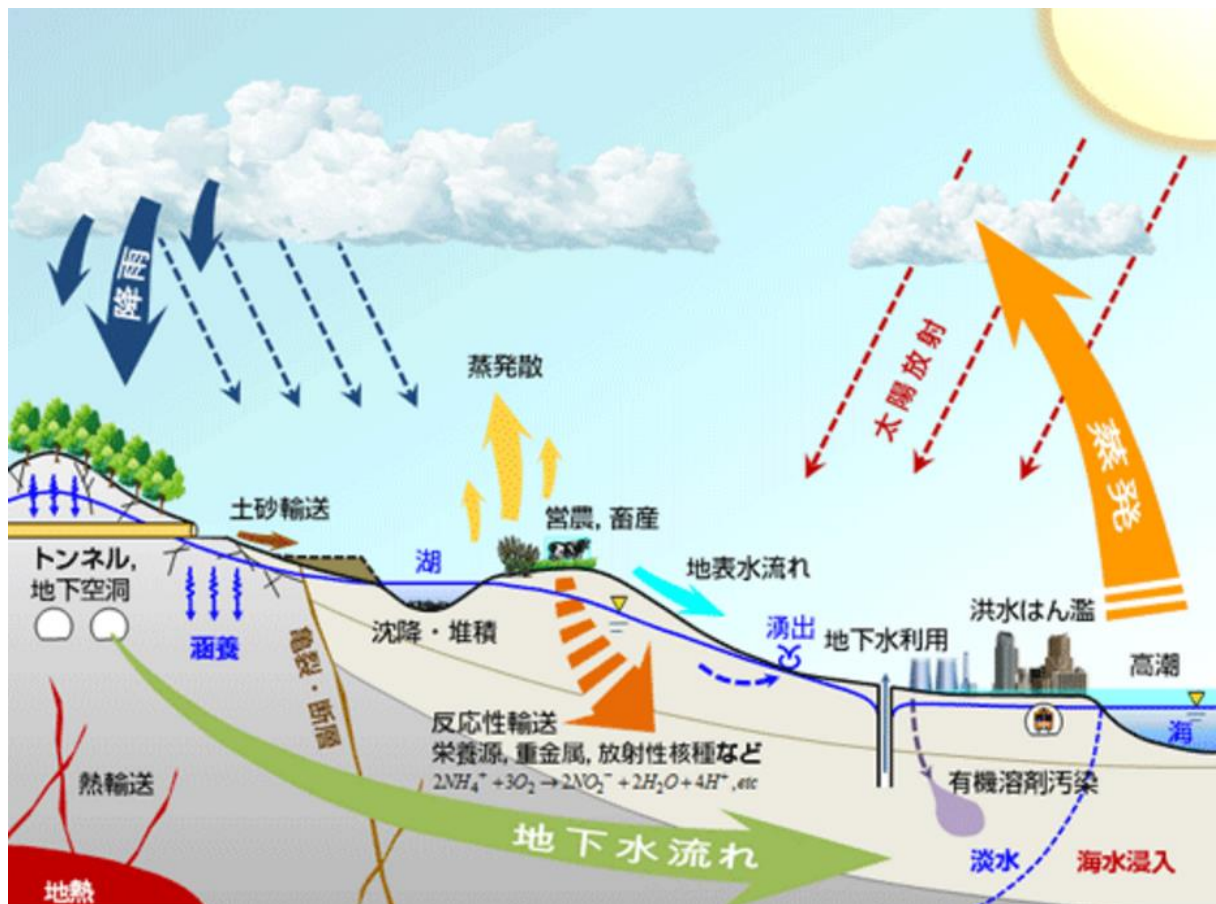


図 2-16 水循環概念図

(2) 水循環解析の支配方程式

流域水循環系における流体運動は、一般化されたダルシーの法則に基づく水・空気 2 相圧縮性流体システムとして記述される。これらは次に示す標準状態における水相の質量収支式(2-4)および空気相の質量収支式(2-5)として表わされる⁴¹⁾。

$$\nabla \left(\frac{Kkr_w}{\mu_w B_w} \nabla \Psi_w \right) - q_w = \frac{\partial \phi S_w}{\partial t} \quad (2-4)$$

$$\nabla \left(\frac{Kkr_g}{\mu_g B_g} \nabla \Psi_g \right) = \frac{\partial \phi S_g}{\partial t} \quad (2-5)$$

ここに、 K :絶対浸透率[m²], kr_w :水相の相対浸透率[-],
 kr_g :空気相の相対浸透率[-], Ψ_w :水相の水理ポテンシャル[Pa],
 Ψ_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[-], ϕ :有効間隙率[-],
 μ_w :水相の粘性係数[Pa・s], μ_g :空気相の粘性係数[Pa・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・単位体積あたりの生産地下水量[m³/(m³・s)]

河川や段丘斜面を流れる地表水流動は、水深が流れの幅に対して十分小さい浅水流と仮定し、速度項、加速度項を省略した拡散波近似を適用した運動量保存式により評価した。これにマニング型の平均流速公式を組み合わせることにより、地表水・地下水の連成挙動を考慮した水循環モデルの非線形流量公式(2-6)を得ることができる。

$$Q = -K^* \cdot A^* \cdot f_1[P_w] \cdot f_2[S_w] \cdot f_3[P_w, S_w] \quad (2-6)$$

表 2-8 に、地表水・地下流体の平均流量公式を示す。これは本来地下流体に対する多相ダルシーの法則を表す式であるが、成分ごとの式を変えることにより、地表流に対する平均流速公式も包含できるものとなっている。幅 W 、高さ H の水路内における 1 次元開水路の場合、地下水に対してはダルシー則、地表水に対しては拡散波近似が、各成分に適用される⁴¹⁾。しかしながら、実際の地表流の計算においては拡散波近似の不安定性が強くなる場合があるため、本解析では拡散波近似の一部をさらに近似した線形化拡散波近似 (Linearized Diffusion Wave) を使用した⁴¹⁾。なお、流れの幅 W と高さ H は空間的に離散化された際の格子幅と高さに相当するものであり、格子内の水深 h は水相飽和度 S_w を用いて $h = S_w H$ で与えられる。

表 2-8 地表水・地下流体の平均流量公式

	ダルシー則	拡散波近似	線形化拡散波近似
K^*	K_x	$\frac{\mu_w}{\rho_w g n} \left(\frac{WH}{2H+W} \right)^{\frac{2}{3}}$	$\frac{\mu_w}{\rho_w g n \sqrt{ i_g }} \left(\frac{WH}{2H+W} \right)^{\frac{2}{3}}$
A^*	WH	WH	WH
$f_1[P_w]$	$\frac{\rho_w}{\mu_w}$	$\frac{\rho_w}{\mu_w}$	$\frac{\rho_w}{\mu_w}$
$f_2[S_w]$	k_{rw}	$S_w^{\frac{5}{3}} \left(\frac{2H+W}{2S_w H+W} \right)^{\frac{2}{3}}$	$S_w^{\frac{5}{3}} \left(\frac{2H+W}{2S_w H+W} \right)^{\frac{2}{3}}$
$f_3[P_w, S_w]$	$\frac{\partial \Psi_w}{\partial x}$	$(\rho_w g)^{\frac{1}{2}} \sqrt{\left \frac{\partial \Psi_w}{\partial x} \right } \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial \Psi_w}{\partial x} \right)$	$\frac{\partial \Psi_w}{\partial x}$

(3) 格子システムの基本構成

図 2-15 に格子システムの概念図を示す。本研究では Z 方向は鉛直面として固定し、平面方向のコーナーポイントの標高は可変とする、コーナーポイント型差分格子を用いた。モデルを任意形状の 6 面体格子で構成することにより、一般的なデカルト格子(直方体格子)では近似的にしか表現出来ない地表斜面や傾斜断層といった空間表現が出来るようになり、複雑な地形起伏や地層構造を実態に沿った形でモデル化することが可能となった。

本解析では、解析領域を大気格子 1 層・地表格子 1 層・地下格子 28 層に分けて表現した 3 次元格子モデルにより空間離散化し、解析を行った。

a) 大気格子

地上の大気層(接地境界層)は格子第 1 層として最上層を構成する。ここは、物理的には毛管圧力は 0 (自由空間) で、非常に大きな容量をもつ大気空間であることから間隙率は数値的無限大とし、浸透率(透水係数に相当)は非常に大きく、水飽和率は極めて小さな空間として設定する。大気格子と地表格子間では圧力勾配にしたがう流動が計算される。

b) 地表格子

地表格子は格子第 2 層として大気格子の一つ下の層を構成し、河川や斜面を流れる地表水、湖沼・海洋の停留水を表現する。モデルでは当該格子底面に地表面があるとし、地表水の移動は地表格子層に沿うマニング型の開水路流れとして扱われる。場所による地表水の易動性(移動し易さ)の相違は、土地利用や被覆に応じた等価粗度係数が設定される。地表層の間隙率は通常 1.0 であり、毛管圧力 0 であるが、地下浸透・湧出においては疑似毛管効果が計算され、浸透・湧出が整合的に表現される。

c) 地下格子

地下格子は格子第 3 層～第 30 層で表現される。地層媒体中の多相多成分流体流動を表現する一般化ダルシー則に従う。地層の水理物性(間隙率、浸透率、毛管曲線、相対浸透率曲線)はそれぞれの格子に対して与えられ、流体圧力、飽和率および濃度などが未知量として解かれる。

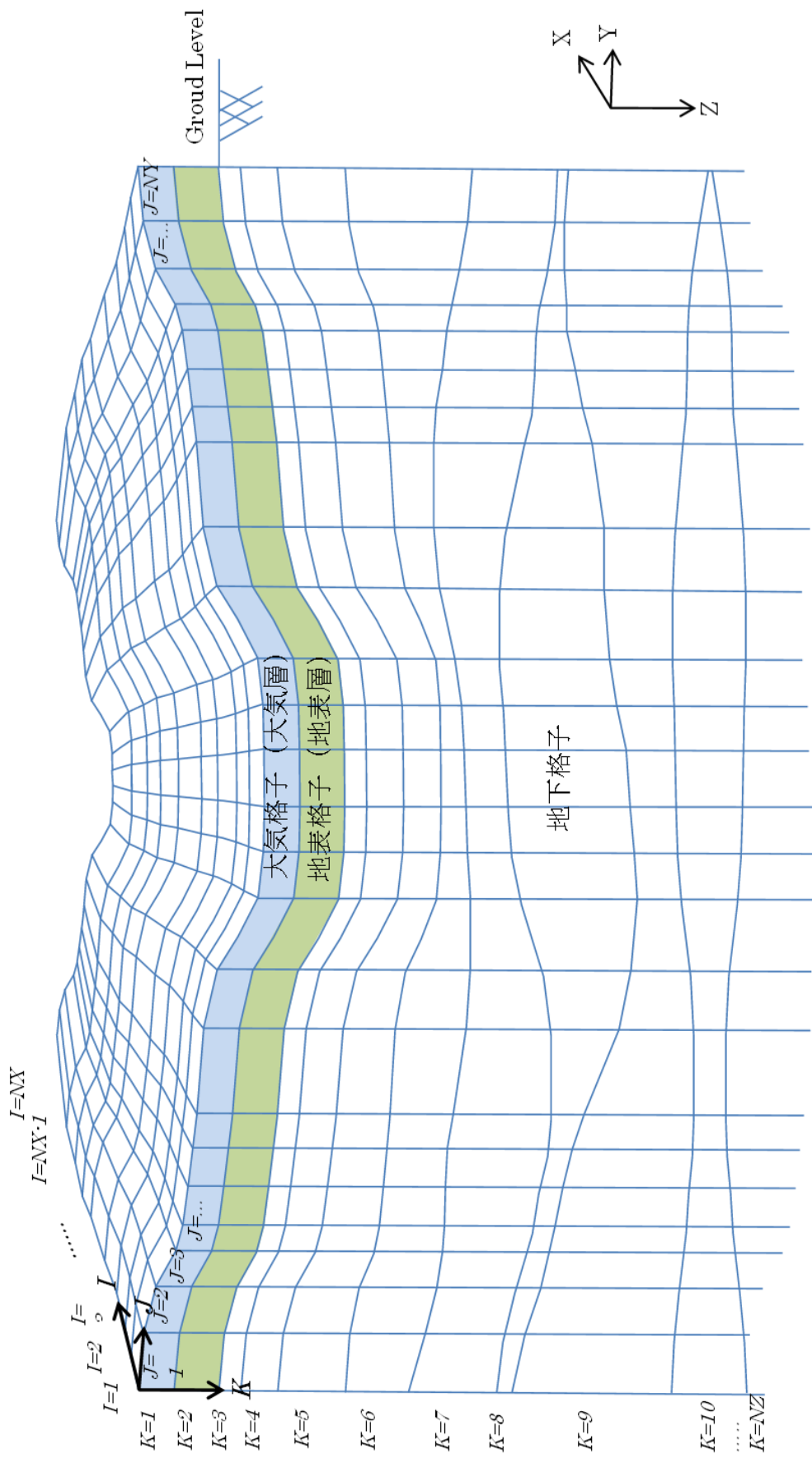
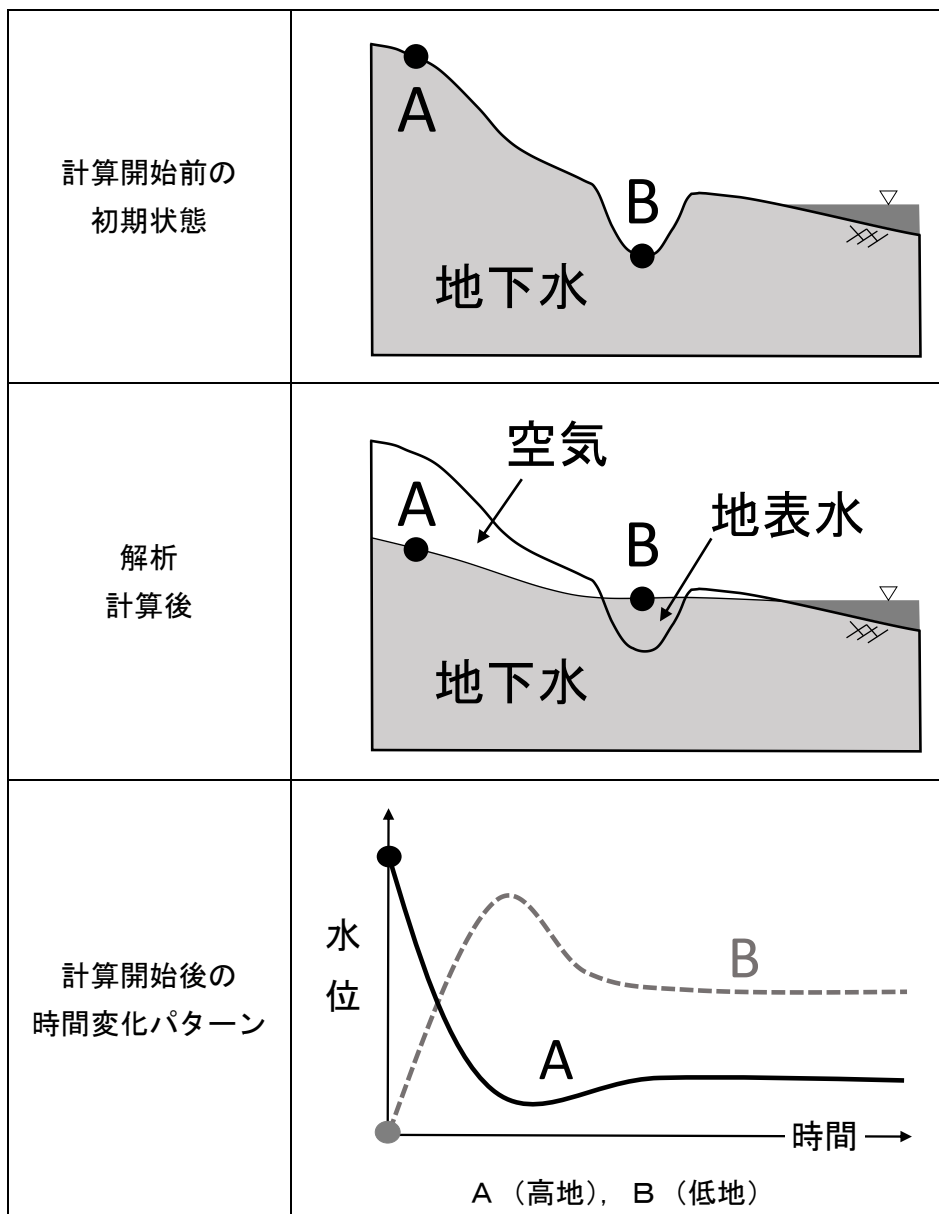


図 2-15 格子システム概念図

(4) 解析の時間変化パターン

表 2-9 に、解析計算の時間変化について推移を示す。本研究では、陸域の地表は乾燥した表流水が無い状態、地下は各地層が地下水で飽和し状態を初期状態と設定した。そして計算を行うことにより地表付近に不飽和帯が発達し、山地は地下水位が低下、谷地には地下水が湧出して河川が出現するように設定した。本解析は定常解析であるため、ほぼ平衡状態に至るまで計算を行い、地下水位等の諸元を出力・可視化した。

表 2-9 解析計算の時間変化



第3章

地下水位の解析結果

第3章 地下水位の解析結果

3-1 現況再現ケース解析値と実測値の比較

図3-1に、地下水位観測地点の位置を示す。本研究では、東京都土木技術支援・人材育成センターが公開⁴²⁾している70井・埼玉県環境部が公開⁴³⁾している22井を、実測地下水位の対象井とした。これら観測井ごとに2012(平成24)・2013(平成25)年に観測された経年平均地下水位を観測された地下水位とし、現況再現ケースでの解析出力地下水位と比較することで、解析の現況再現性を検証した。

表3-1に、出力された現況再現解析地下水位値と実測の経年平均地下水位値を表で比較して示す。また、図3-2には散布図で表す。これらより、全92観測井中80観測井で解析値と観測値の差が10m以内に収まっていることが分かる。また、解析値と観測値の決定係数 R^2 は0.945と非常に高くなっている。このことから、現況再現解析では非常に高い精度で地下水環境を再現できたことが分かる。

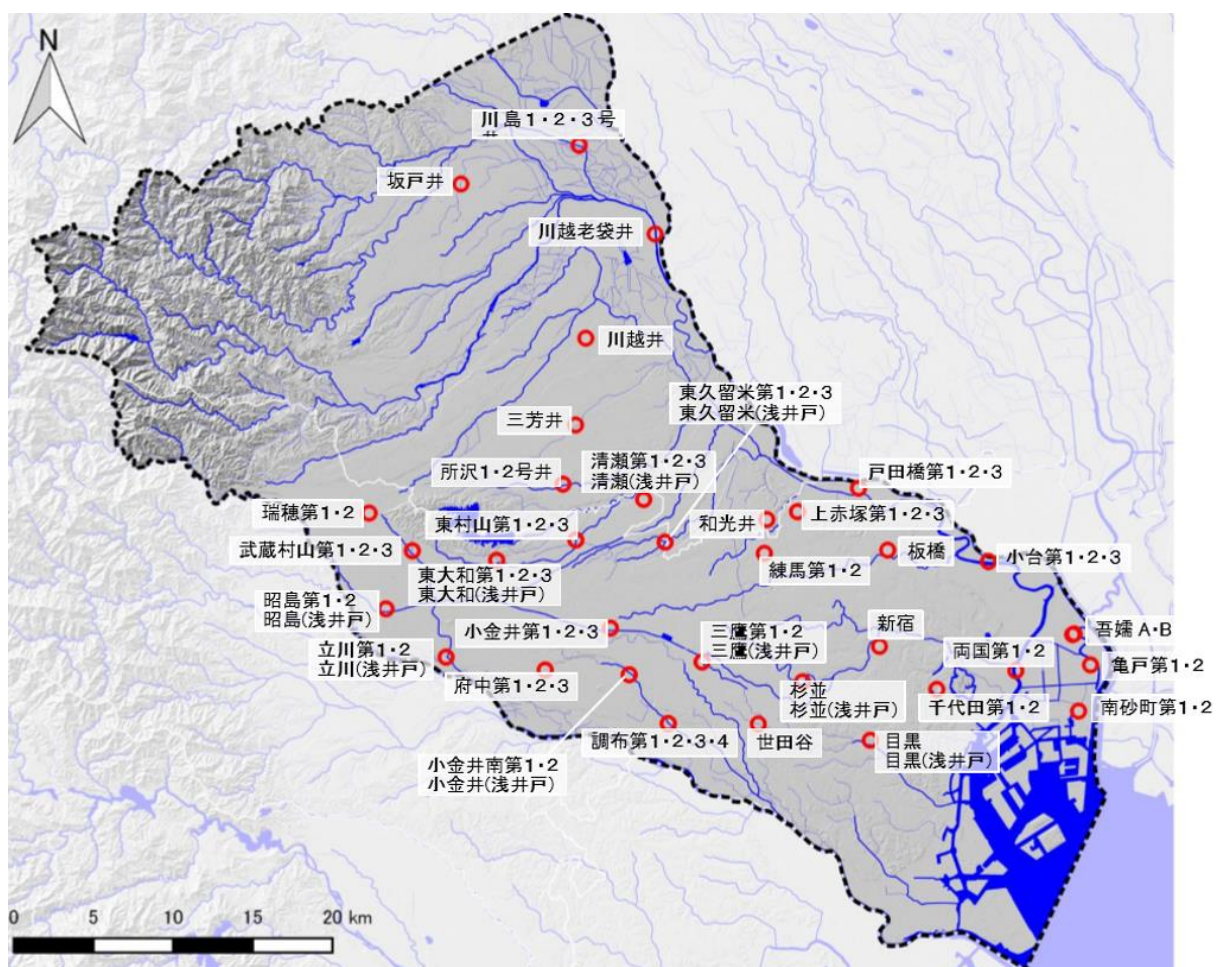


図3-1 地下水位観測地点位置

表 3-1 a) 現況再現解析値と実測値の比較表(東京都)

東京都	解析値 (T.P.+m) ①	実測値 (T.P.+m) ②	差 (m) ①-②	東京都	解析値 (T.P.+m) ①	実測値 (T.P.+m) ②	差 (m) ①-②
東久留米第1	14.87	14.88	-0.01	東久留米(浅井戸)	37.24	36.32	0.91
東久留米第2	15.11	12.07	3.04	清瀬(浅井戸)	40.18	36.76	3.43
東久留米第3	15.58	15.51	0.07	東大和(浅井戸)	85.94	88.31	-2.37
調布第1	27.29	27.83	-0.54	立川(浅井戸)	77.09	70.11	6.98
調布第2	19.86	11.89	7.96	三鷹(浅井戸)	46.65	45.59	1.06
調布第3	13.23	9.38	3.86	昭島(浅井戸)	106.56	108.47	-1.91
調布第4	3.89	11.02	-7.13	小金井南(浅井戸)	42.03	42.55	-0.51
清瀬第1	18.08	20.21	-2.13	亀戸第1	-1.13	-4.67	3.54
清瀬第2	16.13	11.29	4.84	吾孺A	-0.89	-6.28	5.38
清瀬第3	15.61	15.23	0.38	南砂町第1	-0.71	-3.99	3.29
東大和第1	45.88	53.58	-7.70	吾孺B	-0.33	-6.61	6.28
東大和第2	34.18	25.10	9.09	亀戸第2	-0.45	-4.96	4.51
東大和第3	34.18	19.50	14.68	南砂町第2	-0.23	-4.01	3.78
立川第1	67.47	68.06	-0.59	戸田橋第1	0.68	2.30	-1.62
立川第2	66.55	68.36	-1.81	戸田橋第2	1.46	-1.12	2.58
小金井第1	25.79	16.51	9.28	戸田橋第3	0.12	-1.36	1.47
小金井第2	18.25	16.74	1.51	新宿	11.31	9.92	1.39
小金井第3	19.16	19.56	-0.40	練馬第1	20.57	14.69	5.88
武蔵村山第1	81.67	95.48	-13.82	練馬第2	9.35	8.27	1.08
武蔵村山第2	78.82	67.78	11.04	板橋	3.91	2.22	1.69
武蔵村山第3	76.77	63.17	13.60	上赤塚第1	8.27	4.89	3.38
府中第1	42.57	43.24	-0.67	上赤塚第2	4.58	5.98	-1.40
府中第2	27.38	40.36	-12.98	上赤塚第3	4.35	6.13	-1.78
府中第3	27.38	33.74	-6.36	両国第1	1.63	-6.35	7.98
東村山第1	47.12	57.93	-10.82	両国第2	2.32	-6.45	8.76
東村山第2	21.75	21.51	0.24	小台第1	-1.66	-3.92	2.27
東村山第3	20.85	17.72	3.13	小台第2	0.59	-4.45	5.04
瑞穂第1	104.09	89.58	14.51	小台第3	0.51	-4.02	4.53
瑞穂第2	100.80	91.31	9.49	杉並	17.25	25.63	-8.39
三鷹第1	7.62	15.61	-7.99	世田谷	24.52	32.89	-8.36
三鷹第2	14.49	6.31	8.17	目黒	16.86	12.41	4.46
昭島第1	82.43	68.92	13.50	千代田第1	17.55	5.10	12.45
昭島第2	77.92	65.14	12.79	千代田第2	10.06	3.93	6.14
小金井南第1	15.89	19.99	-4.10	杉並(浅井戸)	33.24	33.09	0.15
小金井南第2	16.11	19.51	-3.41	目黒(浅井戸)	24.12	10.01	14.12

表 3-1 b) 現況再現解析値と実測値の比較表(埼玉県)

埼玉県	解析値 (T.P.+m) ①	実測値 (T.P.+m) ②	差 (m) ①-②	埼玉県	解析値 (T.P.+m) ①	実測値 (T.P.+m) ②	差 (m) ①-②
坂戸井	17.12	-13.02	30.14	H20No.B-3	47.36	43.72	3.64
川島1号井	4.18	3.42	0.76	H20No.B-2	46.36	45.17	1.19
川島2号井	5.10	5.86	-0.76	H20No.B-1	48.25	44.52	3.73
川島3号井	7.60	6.81	0.79	H21No.1	50.14	48.80	1.34
川越老袋井	2.78	5.53	-2.75	H21No.2	49.96	47.00	2.96
所沢1号井	21.79	15.82	5.97	H21No.3	53.52	48.83	4.69
所沢2号井	23.34	18.17	5.17	H23No.1	53.52	53.06	0.46
三芳井	20.96	14.14	6.82	H23No.2	55.18	54.79	0.39
川越	13.92	8.69	5.23	H23No.3	57.73	57.45	0.28
和光井	6.86	8.92	-2.06	H23No.4	59.45	60.52	-1.07
H20No.B-5	40.49	38.76	1.73	境橋右岸橋詰め	34.76	34.45	0.30

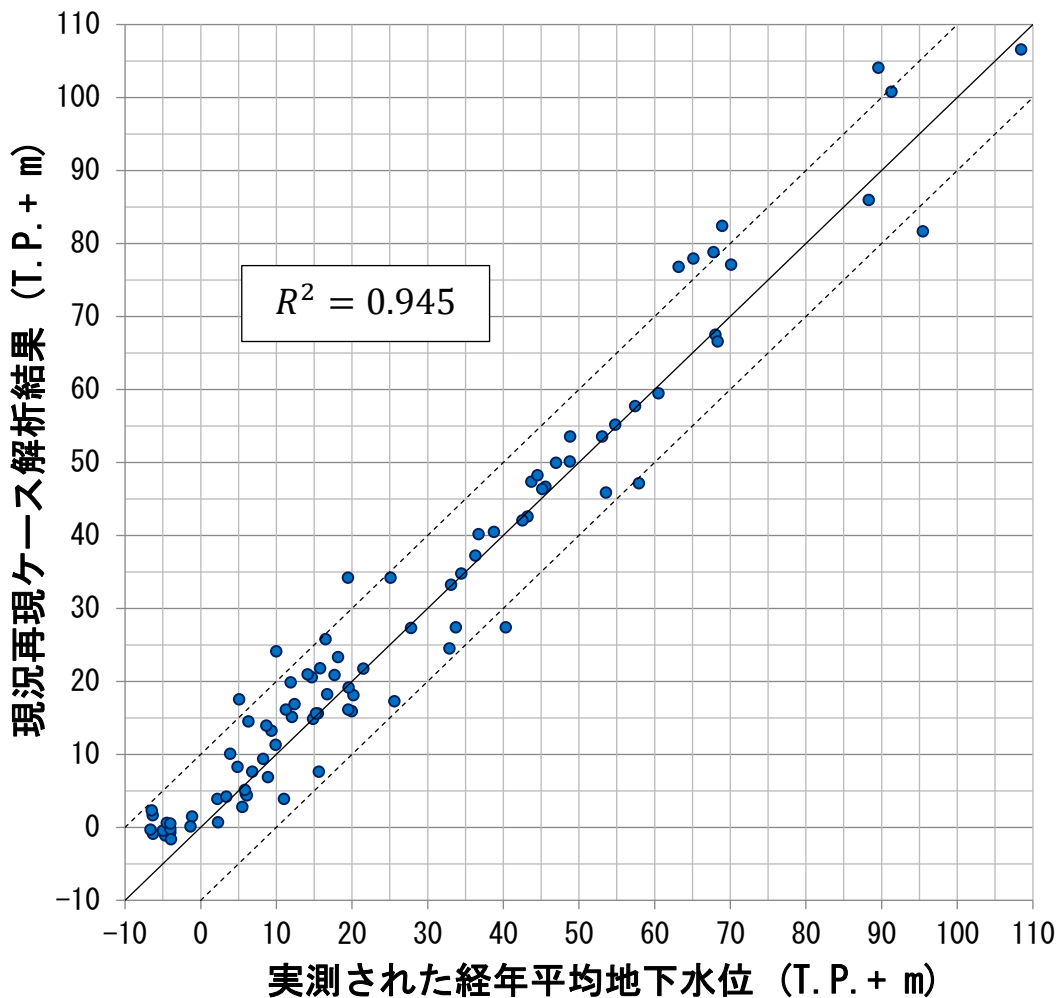


図 3-2 現況再現解析値と実測値の比較散布図

3-2 現況再現ケースと水道揚水停止ケースの比較

図 3-3 に各ケースでの解析地下水位を，図 3-4 に水道揚水の全停止により現況から地下水位がどの程度上昇するか(現況再現ケースでの解析地下水位と水道揚水停止ケースでの解析地下水位の差)を，図 3-5 に図 3-4 のうち北多摩地域および西多摩の一部地域を拡大した図を示す。図 3-4・図 3-5 より，水道揚水停止によって地下水位が上昇する地域は偏在しており，3m 以上上昇する地域は東京都の北多摩地域および西多摩の一部地域に集中していることが分かる。その中でも多摩川沿いの羽村市・福生市・昭島市では平均して 20m 以上の地下水位上昇が見込まれ，最も大きい地点では 28.57m 上昇(羽村市)することが分かった。

以後，この地下水位上昇の原因と水涸れ河川や表流水へ与える影響について考察を試みた。

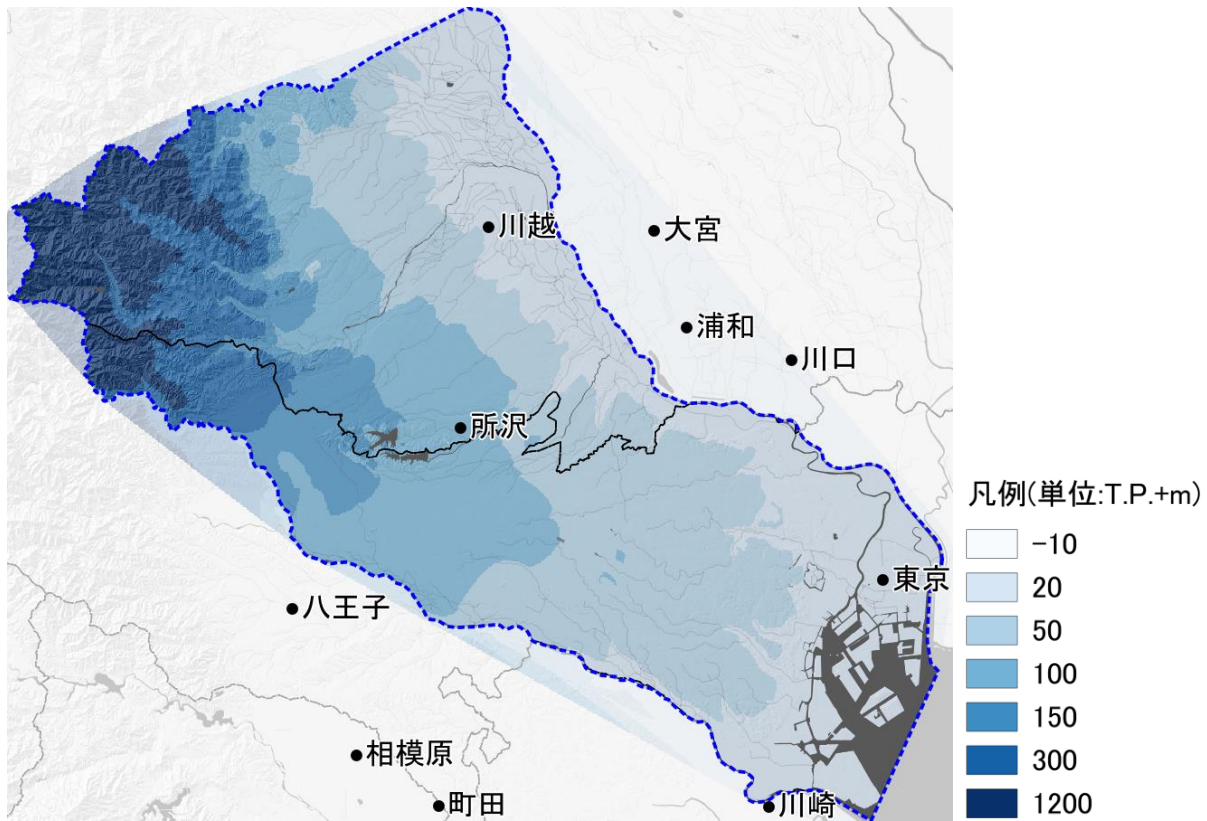


図 3-3 a) 現況再現ケースの地下水位

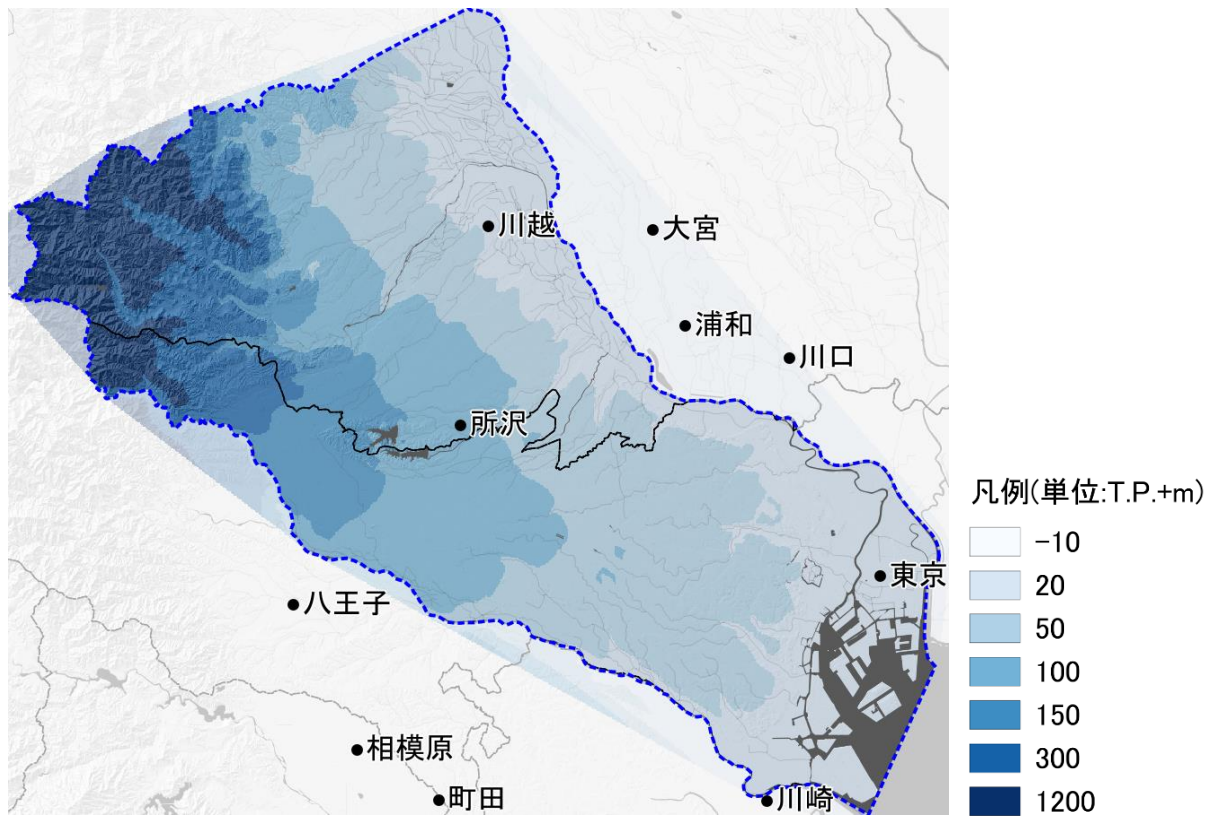


図 3-3 b) 水道揚水停止ケースの地下水位

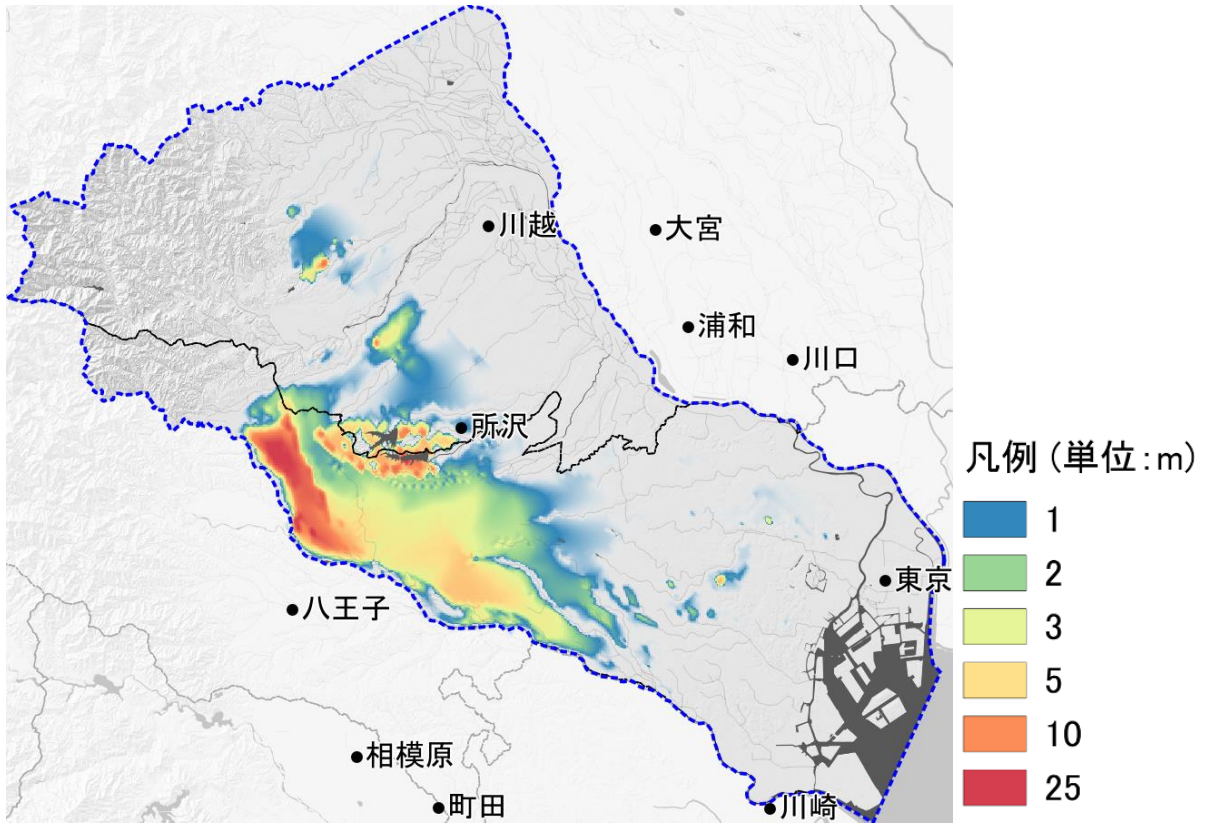


図 3-4 水道揚水停止による地下水位上昇高(全体図)

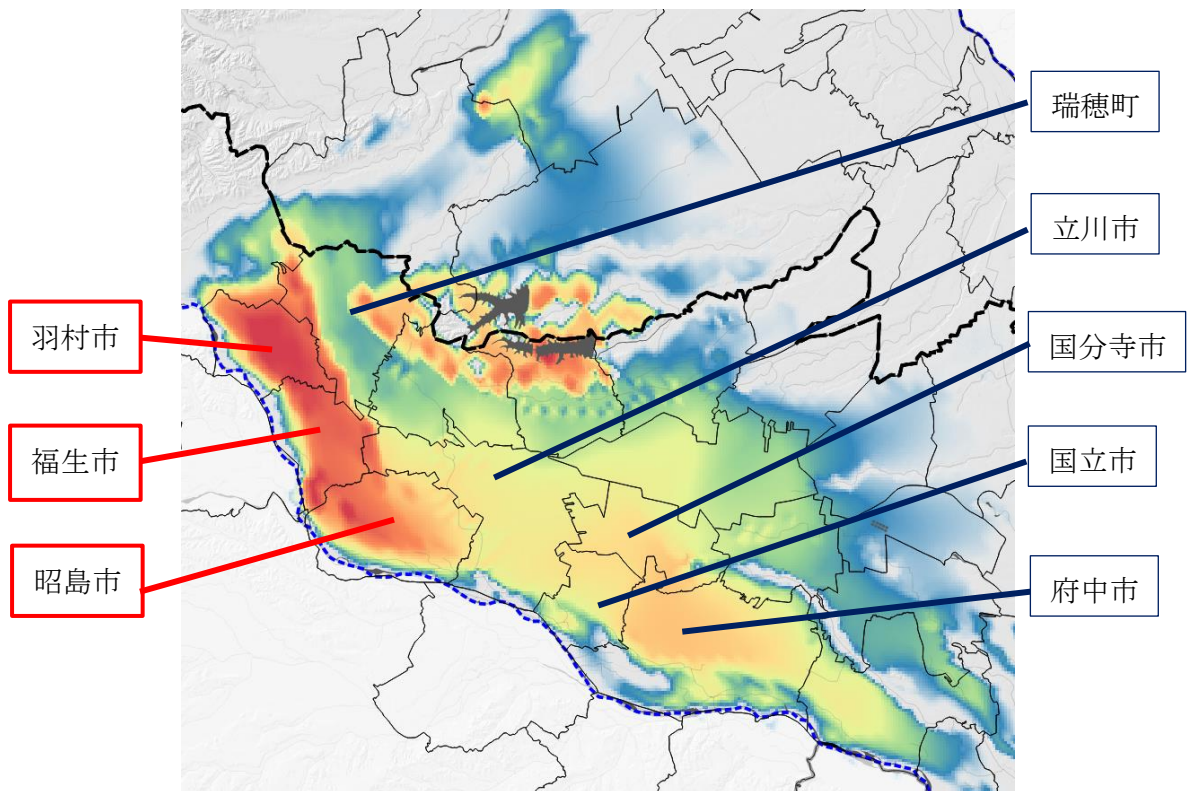


図 3-5 水道揚水停止による地下水位上昇高(北多摩地域および西多摩の一部地域拡大図)

第4章

考察

第4章 考察

4-1 地下水位上昇原因の考察

図4-1に、現況再現ケースと水道揚水停止ケースの自治体別の面積あたり揚水量を示す。図3-4・図3-5において大きな地下水位上昇があった北多摩地域および西多摩の一地域に着目すると、図4-1 a) 現況再現ケースでは他地域に比べて揚水量が多いことが見てとれるが、図4-1 b) 水道揚水停止ケースでは他地域と同程度の揚水量となっている。更に、揚水量が多くない自治体であっても、揚水量が多い自治体に近接する地域であれば、水道揚水が停止すると揚水量が多い地域と同様の地下水位上昇が起こることが分かる。

以下に、現況再現ケースと水道揚水停止ケースについて水道揚水量が多い地域に着目して流跡線を作成することで、水道揚水が地下水流動や地下水位へ与えた影響について考察を行う。

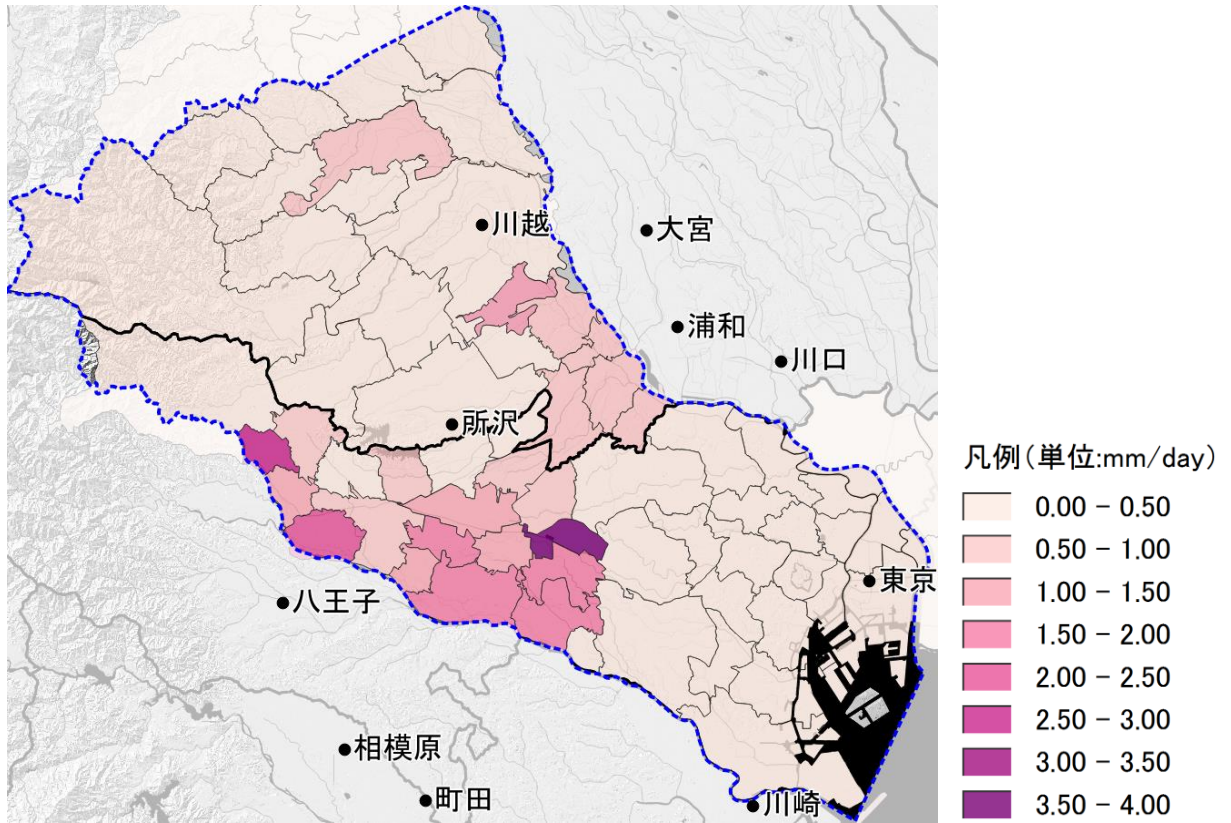


図 4-1 a) 現況再現ケースの揚水量(面積あたり・自治体別)

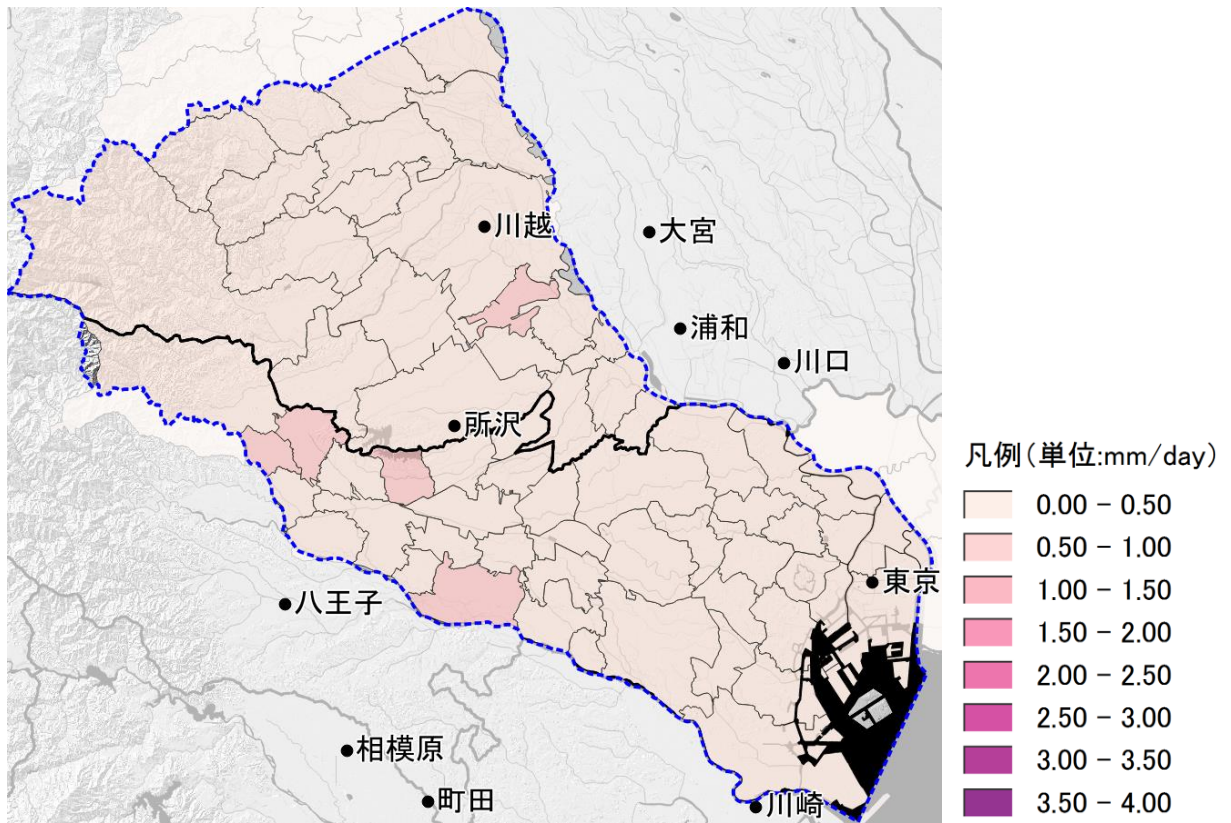


図 4-1 b) 水道揚水停止ケースの揚水量(面積あたり・自治体別)

図 4-2 に、現況再現ケースと水道揚水停止ケースの流跡線を示す。流跡線とは表流水と地下水の動きを一体的に可視化したもので、本研究では実際の揚水が多い深度 150m 地点を出発点として、流動経路を赤い実線で 2 次元平面へ投影表示した。図 4-1 a) の現況再現ケースで水道揚水が多い地域に着目すると、図 4-2 a) の現況再現ケースの流跡線は周辺地域から赤い実線が集中していることから、現況では揚水量が多い地域が周辺地域に存在していた地下水を引き寄せて揚水していることが読み取れる。一方、図 4-1 b) の水道揚水停止ケースの流跡線はほぼ歪むことなく伏流して河川や海へ続いていることから、揚水などの影響をほとんど受けることなく河川や海へ流出することが読み取れる。以上のことから、水道揚水を停止することに伴って、揚水されていた周辺の地下水がそのまま帯水層下面形状に沿って流下するようになったため、水道揚水が多い自治体に加え、その周辺自治体の地下水位も上昇する結果になったと考えられる。

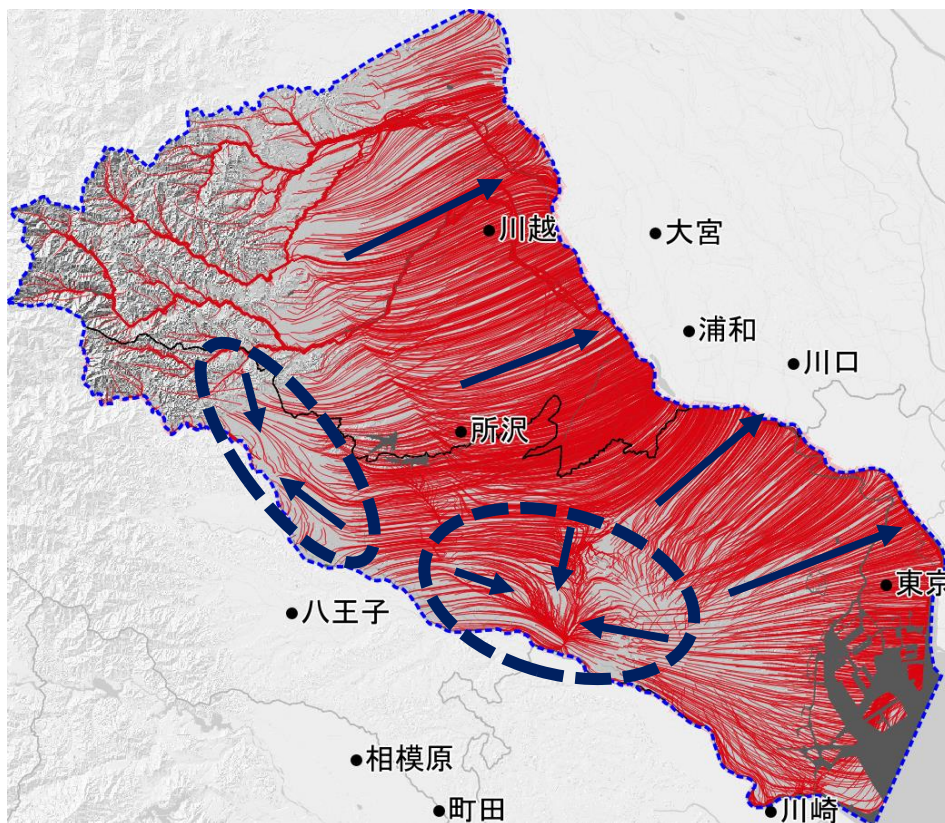


図 4-2 a) 現況再現ケースの流跡線

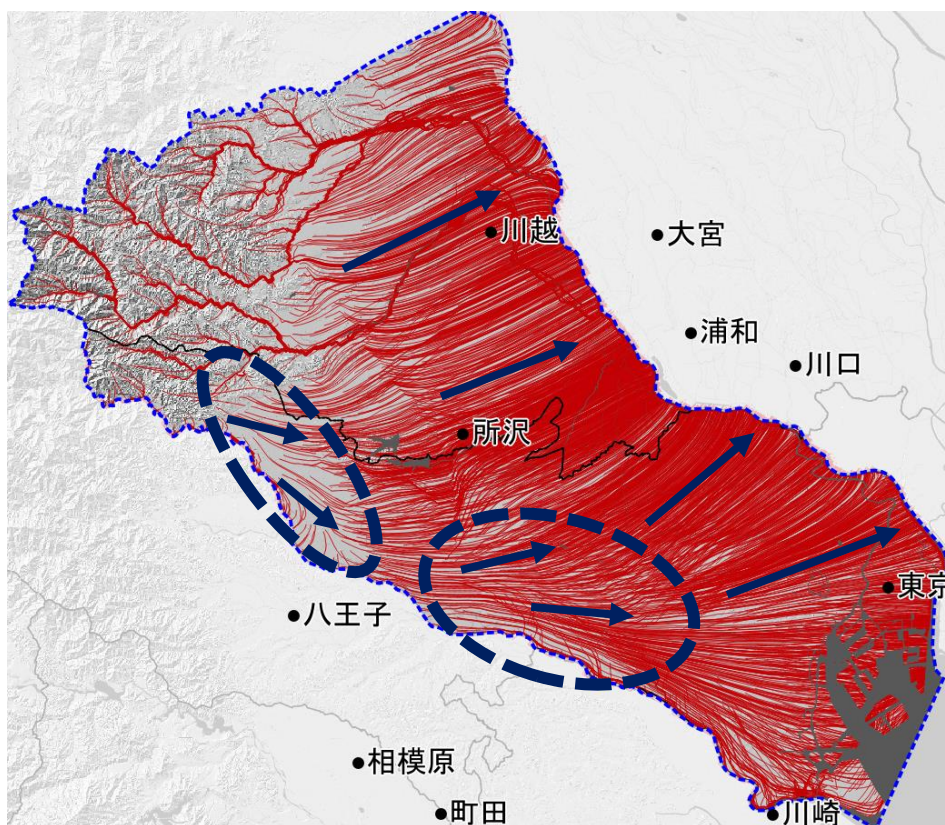


図 4-2 b) 水道揚水停止ケースの流跡線

4-2 水涸れ河川への影響考察

図 4-3 に現況再現ケースと水道揚水停止ケースの地表面への湧出高分布を、図 4-4 に図 4-3 の中で北多摩地域と西多摩の一部地域を拡大した図を示す。ここでの湧出高とは、それぞれの地表面を介して地下から地上へ移動する単位時間あたりの水量を、計算格子面積で除して高さに換算したものである。水涸れが報告されている野川・仙川に着目すると、図 4-3 a) 及び図 4-4 a) の現況再現ケースの湧出高より図 4-3 b) 及び図 4-4 b) の水道揚水停止ケースの湧出高の方が大きくなっていることから、水道揚水停止により湧出高が増加していることが分かる。更に、同じく水涸れが報告されている残堀川・空堀川に着目すると、図 4-3 a) 及び図 4-4 a) の現況再現ケースでは定常状態条件下では河道での湧出水がみられなかったが、図 4-3 b) 及び図 4-4 b) の水道揚水停止ケースでは河道に新たな湧出水が出現している地域があることが分かる。これらの河川は図 3-4 および図 3-5 にて地下水位が上昇した地域に存在していることから、地下水位の上昇に伴って河川への湧出水が増加したものと考えられる。

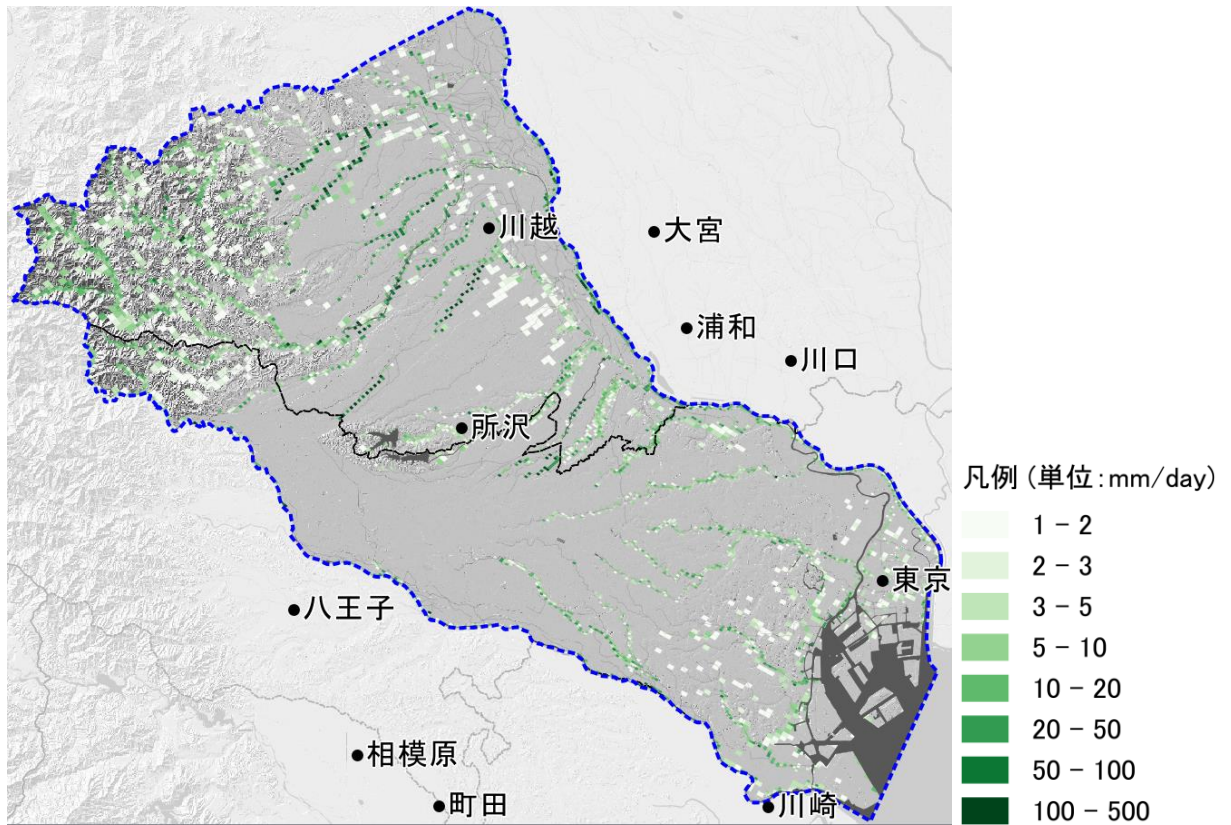


図 4-3 a) 現況再現ケースの湧出高(全体図)

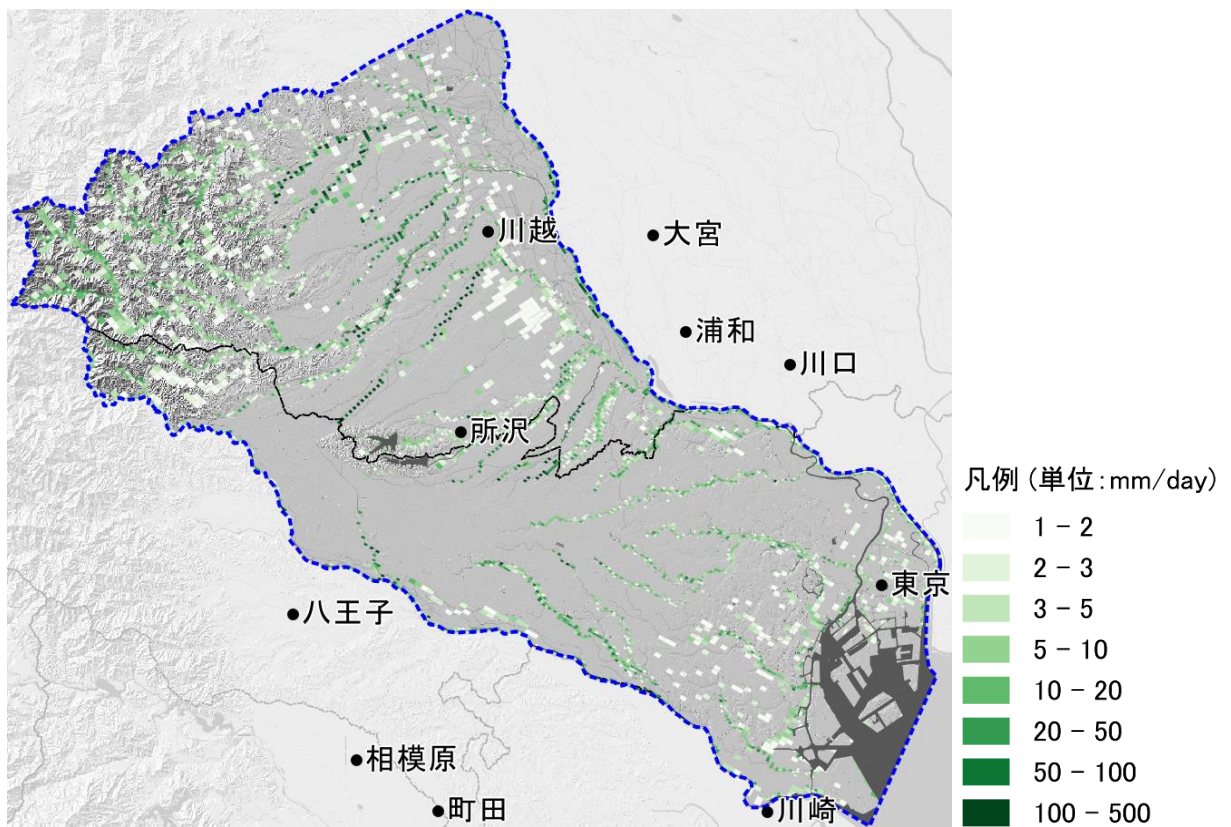


図 4-3 b) 水道揚水停止ケースの湧出高(全体図)

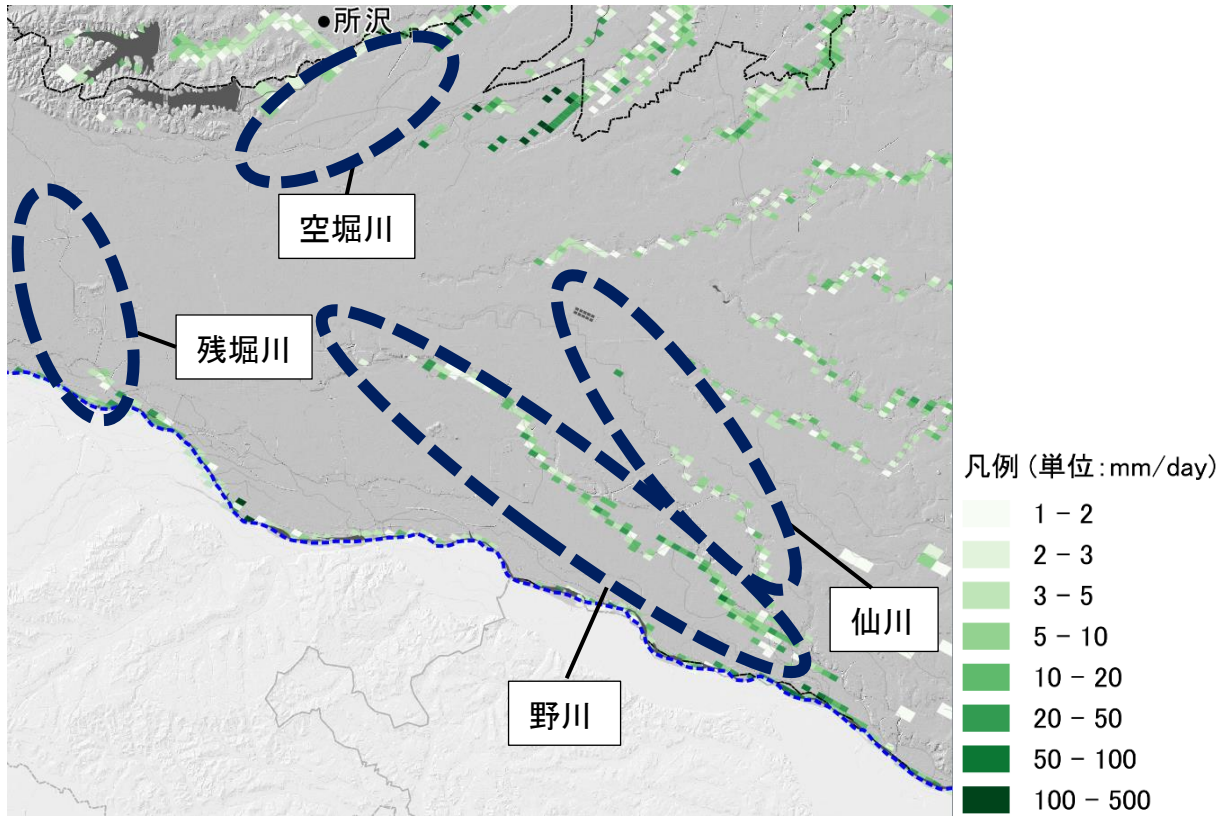


図 4-4 a) 現況再現ケースの湧出高(北多摩地域および西多摩の一部地域拡大図)

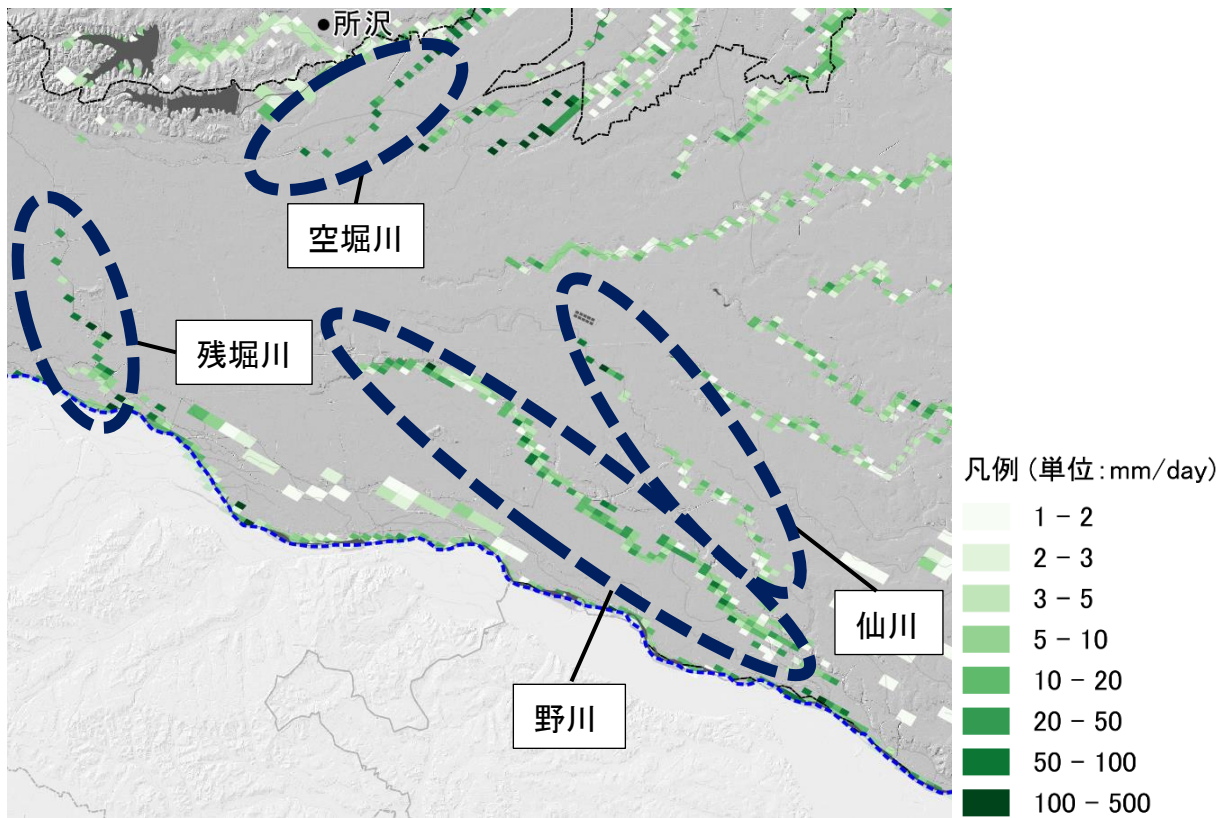


図 4-4 b) 水道揚水停止ケースの湧出高(北多摩地域および西多摩の一部地域拡大図)

図 4-5 に、現況再現ケースと水道揚水停止ケースの表流水深分布を、図 4-6 に図 4-5 の中で 23 区西部と北多摩西部を拡大したもの示す。水涸れが発生している野川・仙川に着目すると、図 4-5 a) 及び図 4-6 a) の現況再現ケースでは表流水が無かった領域に、図 4-5 b) 及び図 4-6 b) の水道揚水停止ケースでは表流水が新たに出現している領域があることが分かる。同様に、現況再現ケースの表流水深より水道揚水停止ケースの表流水深の方が深くなっている地域があることが見て取れる。更に、自然流量が少ない石神井川・神田川などの区部の河川に着目すると、水涸れが発生している河川と同様に、水道揚水停止による表流水の存在領域や表流水深の増加が読み取れる。これは図 3-4・図 3-5 で水道揚水停止により地下水位が上昇した地域に分布しており、図 4-3・図 4-4 で河川への湧出水が増加したことに伴って表流水深が増加したと考えられる。

以上の結果より、水道揚水を停止することで、武蔵野台地上の多くの中小河川で水涸れが緩和され、平時でも水が流れる可能性があることが示唆された。

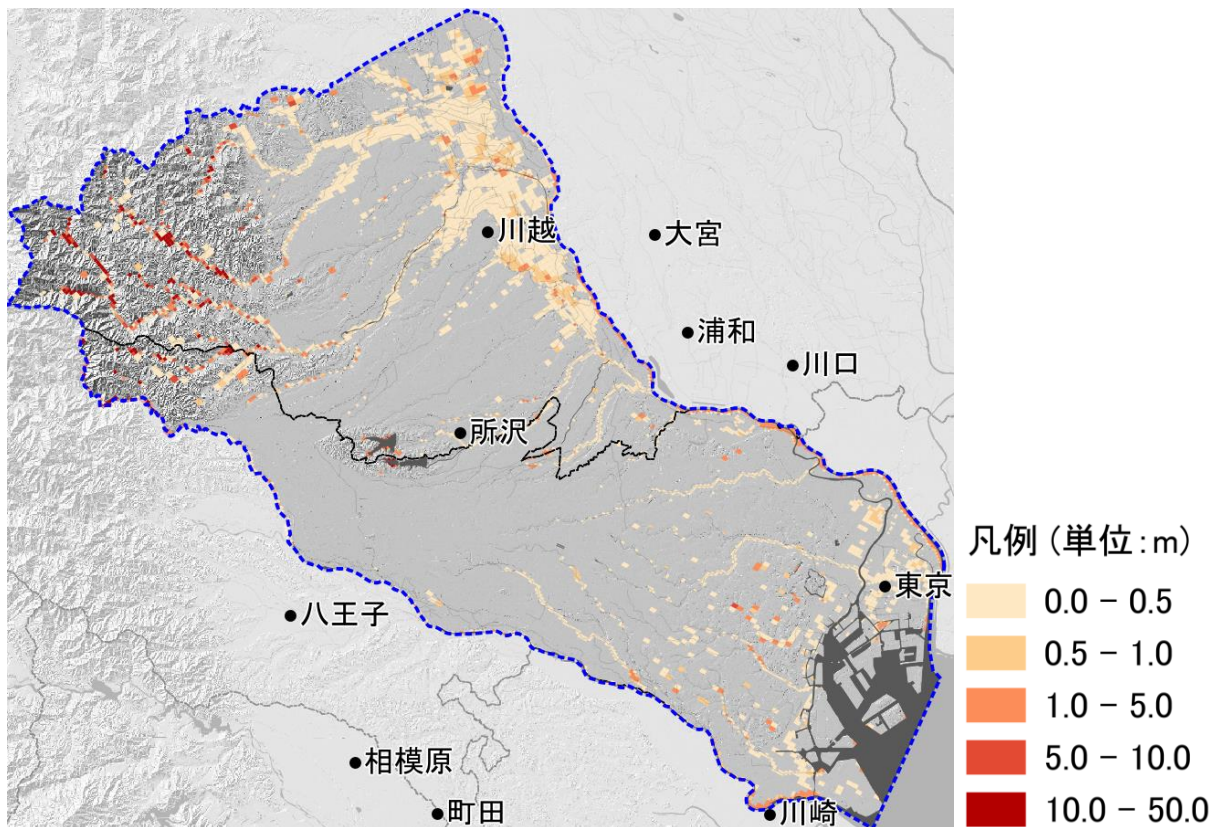


図 4-5 a) 現況再現ケースの表流水深(全体図)

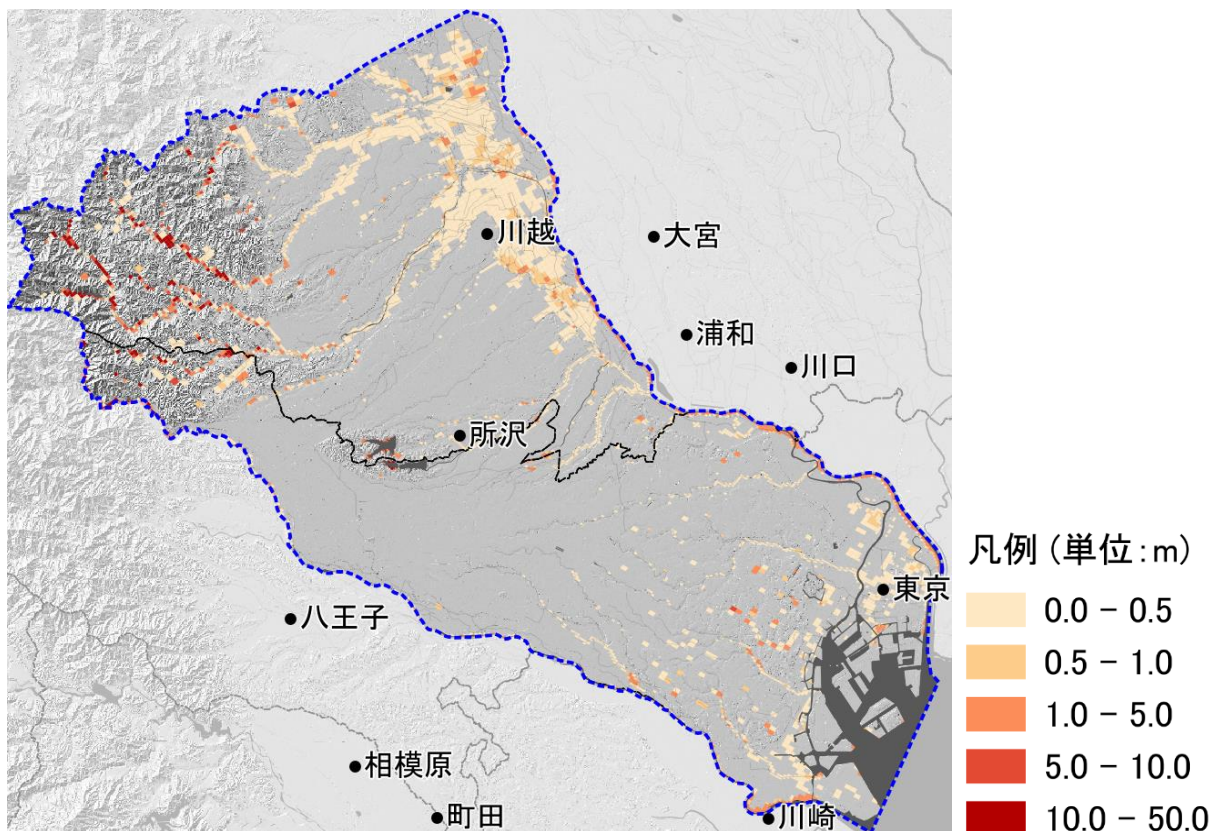


図 4-5 b) 水道揚水停止ケースの表流水深(全体図)

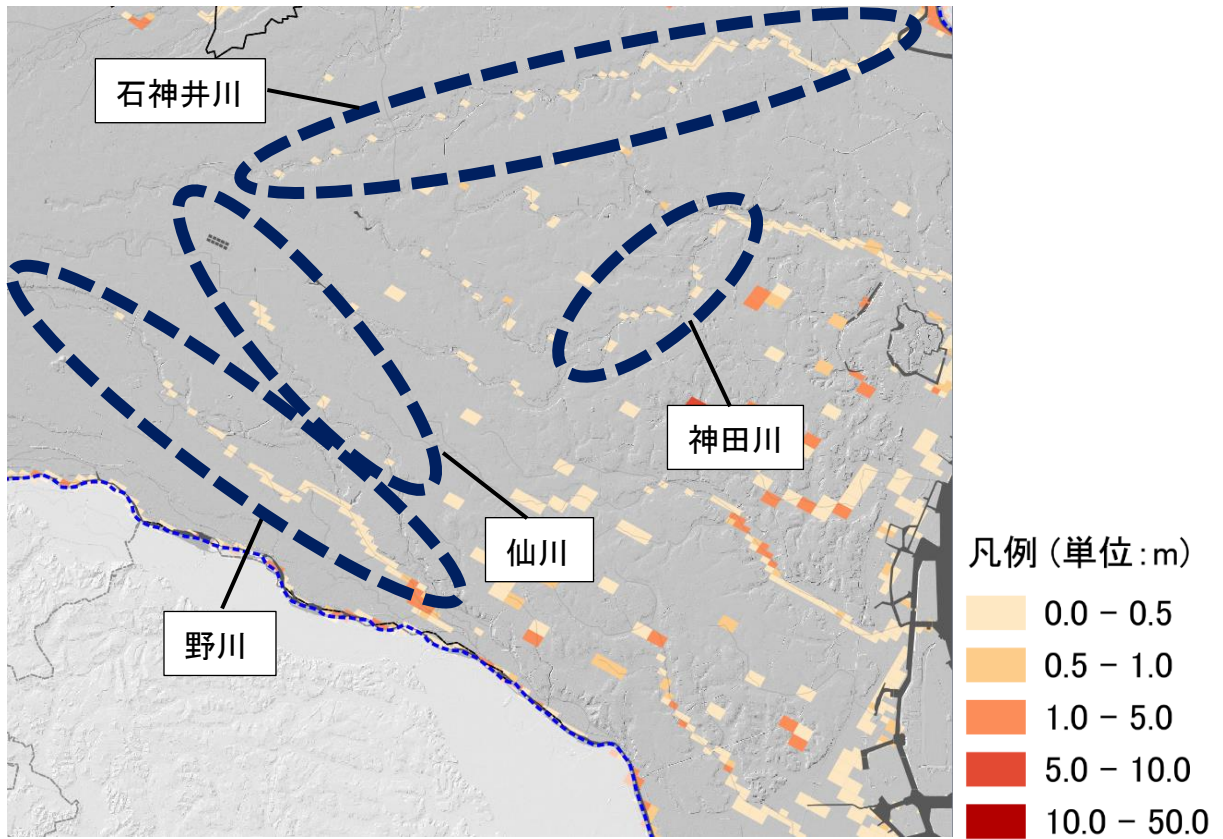


図 4-6 a) 現況再現ケースの表流水深(23 区西部と北多摩西部の拡大図)

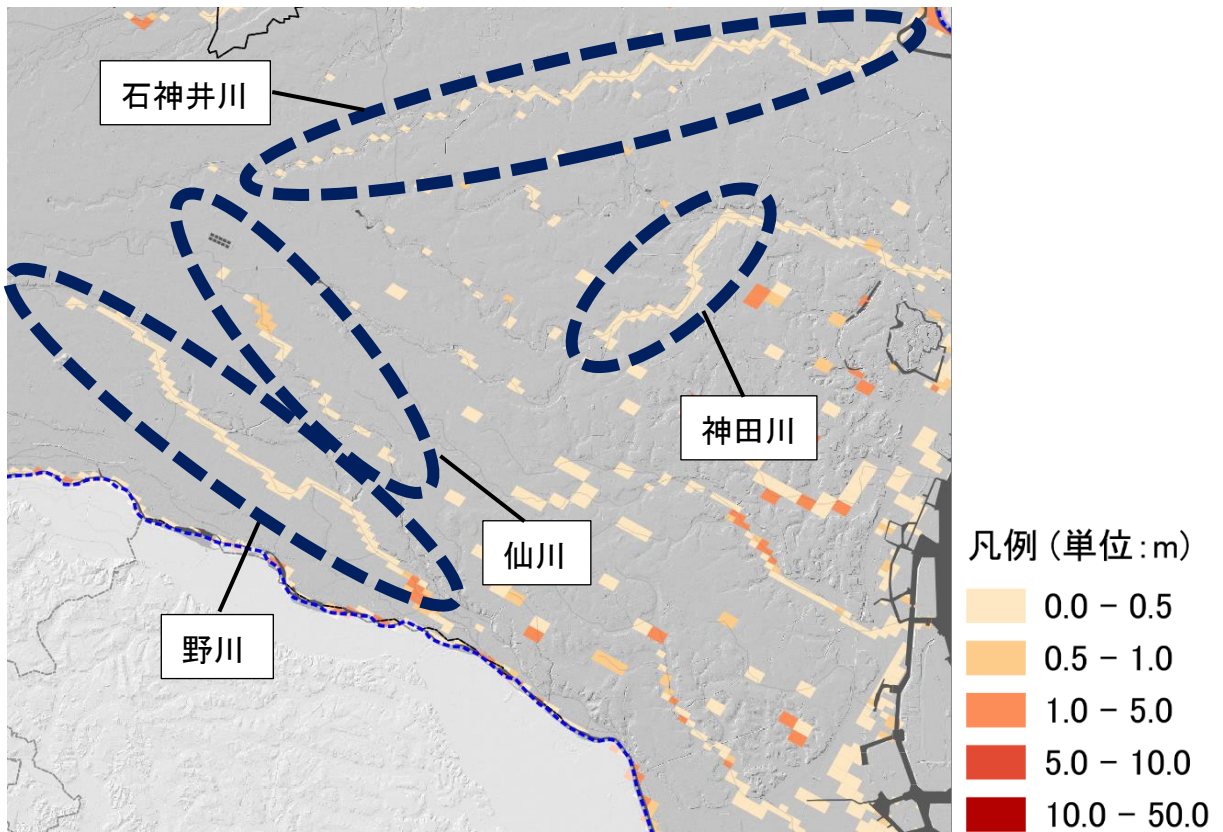


図 4-6 b) 水道揚水停止ケースの表流水深(23 区西部と北多摩西部の拡大図)

第5章

結論

第5章 結論

本研究では GETFLOWS を用いた武蔵野台地調査に関して、まず現況を再現する定常解析を行った。解析結果と観測された経年平均地下水位を比べた結果、92 観測井中 80 観測井で差が 10m 以内に収まっており、2つの値の決定係数 R^2 が 0.945 と非常に高くなっていることから、現況の地下水位状態を高い精度で再現できたことが分かった。加えて、水道揚水を全停止したケースを新たに作成して定常解析を行うことで、水道揚水が地下水位へ与える影響を定量的に評価し、地下水位上昇の原因と水涸れ河川の緩和効果を考察した。解析の結果、水道揚水停止により水道揚水量の多い東京都北多摩地域および西多摩の一部地域を中心に 3m 以上地下水位が上昇し、特に羽村市・福生市・昭島市では平均して 20m 以上の地下水位上昇が見込まれることが明らかとなった。これはケースごとの流跡線を可視化した結果から、現況では水道揚水が多い地域周辺から引き寄せられていた地下水が水道揚水停止に伴い伏流した結果、広域にわたる地下水位上昇が発生したためであると考えられる。そしてこの広域の地下水位上昇に伴い、多摩地域を中心とする河川の一部において湧出高や表流水深の増加が可視化により確認でき、水道揚水の停止が河川の水涸れ緩和に極めて有効である可能性が示唆された。

今回の研究では揚水量減少による河川の水涸れ緩和に焦点を絞り解析を行ったが、この他にも透水性舗装の整備や下水道再生水の導入など、水涸れを緩和させる行政施策は数多く存在する。健全な地下水環境を維持しつつ、持続可能な地下水利用を図るためには、これら施策を効果的に組み合わせた総合的な水循環を、高い精度で把握する必要がある。今後は解析モデルや設定条件の改良を進め、より実社会に即した解析を行うことで、都市部が抱える水環境の課題に対する解決策を明らかにしていきたい。

参考文献

参考文献

- 1) 東京都建設局：東京都河川整備計画について
<http://www.kensetsu.metro.tokyo.jp/jigyo/river/jigyo/kasenseibikeikaku/index.html>
- 2) 川合将文，川島眞一，國分邦紀：「河川の水量確保等に関する検討」の成果と課題，平成 26 年 東京都土木技術支援・人材育成センター年報，pp.115-132，2014.
- 3) 久富悠生，中山大地，松山洋：武蔵野台地における浅層地下水位の長期変動解析および将来予測 —MODFLOW を用いて—，水文・水資源学会誌 Vol.28, No.3, pp.109-123, 2015.
- 4) 東京都環境局地下水対策検討委員会：「これからの地下水保全と適正利用に関する検討について」—平成 27 年度地下水対策検討委員会のまとめ—，pp.104-110，2016.
- 5) 中山俊雄，大澤健二：10.空堀川・柳瀬川流域の地盤，平成 28 年 東京都土木技術支援・人材育成センター年報，pp.99-105，2016.
- 6) 牟田和基，木内豪，仲谷知之：多摩川流域における地下水と河川水の相互作用の解析，水文・水資源学会誌 Vol.28, No.3, pp.109-123, 2015.
- 7) 木内豪，賈仰分：流域スケールの水循環・熱油層モデリングと都市河川流域への適用，水工学論文集，第 52 巻，pp.385-390，2008.
- 8) 伊藤成輝，丸井敦尚：日本列島における海底地下水湧出量の分布，日本水文科学会誌 第 40 巻，第 1 号，pp.1-18，2010.
- 9) 小泉謙，古川克彦：関東平野における水理地質モデルの構築と地下水ポテンシャル再現の試み，平成 21 年 特別講演およびシンポジウム予稿集，pp.50-59，2009.
- 10) 小泉謙，忌部正博：16.関東地下水盆への地下水流動モデル適用の試み，平成 20 年 研究発表会講演論文集，一般社団法人日本応用地質学会，pp.31-32，2008.
- 11) 愛知正温，徳永朋祥，小泉謙，古川克彦，斎藤庸：広域地下水流動と地下水流動・地盤変形の連結モデルを用いた関東平野中北部の地盤沈下再現解析，平成 20 年 研究発表会講演論文集，一般社団法人日本応用地質学会，pp.195-196，2008.
- 12) 安間智之，小路剛志，伊藤弘之，藤田光一：流域水物質循環モデルを用いた東京湾と流入河川における水質変遷再現について，水工学論文集第 50 巻，pp.1381-1386，2006.
- 13) 法令データ提供システム：水循環基本法(平成二十六年四月二日法律第十六号)
<http://law.e-gov.go.jp/htmldata/H26/H26HO016.html>
- 14) 首相官邸 水循環政策本部：水循環基本計画(平成 27 年 7 月 10 日閣議決定)
http://www.kantei.go.jp/jp/singi/mizu_junkan/kihon_keikaku.html
- 15) 著者に照会してください
- 16) 古野邦雄，香川淳，笠原豊，下平明利，山本真理：関東地下水盆の 2008 年の地下水位，平成 21 年度 千葉県環境研究センター年報（地質環境），2009.
- 17) 東京都土木技術支援・人材育成センター：平成 25 年末の地下水位等高線図，平成 25 年地盤沈下調査報告書，p.11，2014.

- 18) 国土交通省：水文水質データベース <http://www1.river.go.jp/>
- 19) 国土交通省：国土地理院基盤図情報 <http://www.gsi.go.jp/kiban/>
- 20) 日本河川協会：建設省河川砂防技術基準案同解説 調査編
http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/gijutsu/gijutsukijunn/chousa/pdf/00.pdf
- 21) 東京都 土木技術支援・人材育成センター：東京の地盤(GIS 版)
<http://www.kensetsu.metro.tokyo.jp/jigyo/tech/start/03-jyouhou/geo-web/00-index.html>
- 22) 東京都土木技術研究所：東京都総合地盤図 (II) 東京都の地盤 (2) 山の手・北多摩地区, 1990.
- 23) 遠藤毅：東京都付近の地下に分布する第四紀の層序と地質構造, 地質学雑誌第 84 巻第 9 号, pp.505-520, 1978.
- 24) 遠藤毅, 川島眞一, 川合将文：北多摩地区の地下地質, 応用地質 36 巻 4 号, pp.17-26, 1995.
- 25) 遠藤毅, 中村正明：東京都区部の深度地盤構造とシルト層土質特性, 土木学会論文集, No.652/III-51, pp.I_185-I_194, 2000.
- 26) 鈴木宏芳：関東平野の地下地質構造, 防災科学技術研究所研究報告 第 63 回, pp.1-19, 2002.
- 27) 独立行政法人 産業技術総合研究所 地質調査総合センター：青梅地域の地質 5 万分の 1 地質図幅および説明書, 地域地質研究報告, 2007.
- 28) 独立行政法人 産業技術総合研究所：20 万分の 1 シームレス地質図
<https://gbank.gsj.jp/seamless/v2/>
- 29) 川合将文, 石原成幸, 國分邦紀, 高橋賢一：13.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, 平成 23 年 東京都土木技術支援・人材育成センター年報, pp.139-146, 2011.
- 30) 川合将文, 川島眞一, 石原成幸, 清水武博：11.野川上流域の水文環境の考察, 平成 18 年 東京都土木技術支援・人材育成センター年報, pp.131-142, 2006.
- 31) 川合将文, 石原成幸, 川島眞一, 國分邦紀：3.野川上流域における河川水量確保に関する検討, 平成 20 年 東京都土木技術支援・人材育成センター年報, pp.39-50, 2008.
- 32) 東京都建設局：河川計画・河川区域・河川保全区域
<http://www.kensetsu.metro.tokyo.jp/jigyo/river/jigyo/kuiki/kuiki.html>
- 33) 気象庁：メッシュ平年値図 2010 <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/atlas.html>
- 34) 東京都下水道局：「区部下水道全体計画図」「流域下水道全体計画図」, 東京都下水道局事業概要 平成 27 年版, 2016.
- 35) 埼玉県下水道局, 埼玉県都市整備部：埼玉の下水道 平成 27 年度版, pp.11-20, 2015.
- 36) 東京都環境局：平成 25 年 都内の地下水揚水の実態 (地下水揚水量調査報告書), pp.34-37, 2015.
- 37) 埼玉県環境部：平成 24・平成 25 年 地域別 用途別 市町別 月別 地下水採取量, 埼玉県地盤沈下調査報告書(平成 24・25 年度観測結果), 2014,2015.

- 38) 環境省：全国地盤情報ディレクトリ 関東平野南部(東京都)
<http://www.env.go.jp/water/jiban/directory/kantou.html>
- 39) 国土交通省：全国地下水資料台帳
<http://nrb-www.mlit.go.jp/kokjo/inspect/landclassification/water/basis/underground/F9/exp.html>
- 40) 株式会社 地圏環境テクノロジー：GETFLOWS とは
<http://www.getc.co.jp/software/aboutgetf/>
- 41) Hiroyuki Tosaka, Kazumasa Itoh, Takashi Furuno : Fully coupled formulation of surface flow with 2-phase subsurface flow for hydrological simulation, Hydrological Process.14, pp.449-464, 2000.
- 42) 東京都 土木技術支援・人材育成センター：地盤沈下と地下水位の観測記録(平成 24・平成 25 年), 平成 26・27 年 東京都土木技術支援・人材育成センター年報, 2014,2015.
- 43) 埼玉県環境部：月平均地下水位観測表 (平成 24・平成 25 年), 平成 24・平成 25 年 地盤沈下・地下水位観測年報, 2014,2015.

謝辞

まず主査であり指導教員である河村明先生には、論文推敲やスライド訂正などの他にも、地圏環境テクノロジーとの繋がりを作っていただいたり、研究の様子を見に来ていただいたりなど、長い間気にかけていただきました。就職活動との兼合いや修士研究の終着目標について私に一任していただいたことで、のびのびと自分のやりたいことを進めることができました。本当にありがとうございました。

更に天口英雄先生には QGIS の使い方を教えていただいたり、GETFLOWS パソコンのセッティングを手伝っていただいたりしたことで、修論研究を滞りなく進めることができました。重ねて御礼申し上げます。

そして1年以上に渡って訪問させていただいた株式会社地圏環境テクノロジーでは、才田進氏をはじめ多くの方々にお世話になりました。GETFLOWS の理論体系・解析作業・可視化手法に至るまで丁寧に教えていただいたほか、大学での作業環境構築を手助け、水循環に関する貴重な話など、あらゆる場面でサポートをしていただきました。皆様の助言や協力がなければ、シミュレーションに関する知識をここまで深めることも、本論文を完成させることも成しえなかったと思います。本当にありがとうございました。

また東京都建設局河川部の石原成幸氏には、修士論文および学会論文の推敲、数多くの参考資料の提供。さらに後輩の指導まで、あらゆる場面で多岐にわたる御協力をいただきました。研究以外にも河川行政や都の内容など、貴重な話をたくさん聞くことができました。学部の頃よりずっと面倒を見ていただき、感謝してもしきれません。心より御礼申し上げます。

そして副査である東京都土木技術支援・人材育成センターの高崎忠勝氏には、武蔵野台地の水循環解析業務成果の提供や、発表スライドのチェックなど、終始研究に携わっていただき、非常に励みになりました。同じく副査を担当していただいた水環境工学研究室の荒井康祐先生からは、自分が理解しきれていなかった部分を指摘していただいたおかげで、本解析の知見を更に深めることができました。ありがとうございました。

そして学部の高見彬君には、GETFLOWS パソコンのセッティングを行ってもらいました。私一人では研究と並行して設定を行うことは出来ませんでした。ありがとうございました。

最後に本研究室の皆様には、研究や学業に携わる事柄から、飲み会や旅行などのイベントに至るまで、公私両面で幅広く心の支えになりました。研究に没頭して大学で過ごした一日も、疲れた体で騒ぎ笑ったゼミ合宿も、夜通し遊んだゼミ室の飲み会も、全てが色褪せることなく素晴らしい思い出として心の中に残っています。このメンバーで過ごせて幸せです。

この3年間、河村先生の下でこの研究室に所属できて、本当に良かったと感じています。私に関わった全ての水文研関係者と地圏環境テクノロジー関係者に、ここまで応援してくれた両親に、最大限の感謝を捧げます。本当にありがとうございました。

首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域 水文研究室
大崎 友輔

付 録

- ・ 武蔵野台地の地下水に関する歴史的背景…………… A-1

・武蔵野台地の地下水に関する歴史的背景

本稿では、武蔵野台地調査が行われるようになった背景への理解を深めるため、武蔵野台地の地下水環境の歴史を記述する。

現在に至るまで、武蔵野台地における地下水環境は著しく変化してきたと言われている。従来地下水は土地の付属物とみなされ、取水等の利用は土地所有者に権利が与えられてきた。地下水は水温・水質が概ね安定しており、東京湾周辺には南関東ガス田と呼ばれる天然ガス田が広がっていたこともあって、戦後復興期から高度経済成長期にかけて、水道水源・水溶ガス回収といった様々な目的により首都圏の地下水は大量に汲みあげられた。結果、都内の多くの地域において地下水位の大幅な低下を起因とする深刻な地盤沈下が発生し、特別区東部を中心に海拔ゼロメートル地帯が出現するなどの被害が発生した。

このため、国は工業用水法(1956(昭和 31)年)、建築物用の地下水の採取の規制に関する法律(1964(昭和 39)年)といった法整備を行い、地下水取水の規制を行った。これに続いて、地方自治体も東京都公害防止条例の改正(1970(昭和 45)年)や埼玉県公害防止条例の改正(1971(昭和 46)年)などの条例整備、代替水源の確保やガス鉱業権買収といった行政対策を行っていった。その結果、2016(平成 28)年までに東京都で観測された地下水位は最大で約 60m 上昇し、2011(平成 23)年に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動を除けば過去 20 年間に 2cm 以上の地盤沈下を生じていない。このことから、地下水位の低下を起因とした地盤沈下は近年沈静化の傾向にあると言える。

一方で、地下水の水利権の所在は現在もはっきりしているとは言えない状況にある。これは地下水を公共の水として規定すると、行政は水を管理するという法的責任を負わなければならないが、私権の取扱いを中心とした合意形成を得なければならないことが原因であると考えられる。そのような公共管理を行うためには、前段階として地下水を含めた包括的な水循環機構を合理的根拠に基づいて高い精度で把握し、地下水が管理可能な存在であることを行政が明らかにすることが不可欠である。しかし現状では東京都や埼玉県を始めとした多くの地方公共団体ではこのような水循環解析評価を地下水施策へと十分に生かす段階までに至っておらず、揚水規制が唯一の地下水管理策である地域も少なくない。

このような状態が続く中、武蔵野台地における地下水問題はより複雑なものとなっている。荒川周辺の低地部では、低下した地下水位状態を基に設計された地下構造物において、水位上昇に伴う地下躯体の浮き上がりや構造物への湧入水の増加が報告されている。一方で、武蔵野台地には 2014(平成 26)年現在も市町面積あたり 2mm/日を超える揚水を行っている自治体が存在しており、付近を流れる空堀川・残堀川などは河床より平均地下水位面が低くなっているため水涸れがたびたび発生している。さらに、揚水技術の進歩により影響評価知見の乏しい大深度地下からの多量の温泉汲み上げ・災害用揚水施設の維持管理を名目とした日常的な取水など、経費削減を目的とした民間の地下水利用事例が増加する懸念も続いており、これら状況も依然として楽観視できるものではない。郊外の都市化・上水道の漏水減少・隣接自治体を含めた揚水量増減や、それらを発生させる社会的および自然的なトレンドやイベ

ントなど、地下水位変動に影響を与える可能性がある要素はいくつも存在しており、放置しておけば地下水をめぐる問題は今後ますます複雑化・深刻化していくことが考えられる。

このような社会的背景を踏まえ、国は水循環基本法(2014(平成 26)年)の制定し、地下水を「公共性の高い国民共有の財産」と定め、翌年の水循環基本計画(2015(平成 27)年)では「持続可能な地下水の保全と利用の推進」を行うことを明文化した。その目的を達成するため、地下水課題の共通認識の醸成・地下水利用や挙動の実態把握と分析等に関するマネジメントを、地方公共団体などの地域の関係者が主体となって取り組むように示した。この流れに続く形で、東京都の地下水対策検討委員会は『これからの地下水保全と適正利用に関する検討について』(2016(平成 28)年)を公表し、地下水の「保全と適正な利用」をテーマとして、地下水揚水モニタリングや広域的な地下水連動の分析を行っていく必要があることを提示した。これら事例からも、国・自治体レベルで地下水管理議論の活発化や地下水流動解析の重要性が今後高まることが予想され、将来的には地下水を含めた総合的水循環を定量的に取り扱う統合型シミュレーションの構築が必要不可欠になっていくと考えられる。