

井の頭池における降雨と地下水位との 対応関係及び地下水位解析

藤村 和正¹・高崎 忠勝²

¹正会員 明星大学准教授 理工学部建築学科 (〒191-8506 東京都日野市程久保2-1-1)
E-mail: fujimura@ar.meisei-u.ac.jp

²正会員 東京都土木技術支援・人材育成センター (〒136-0075 東京都江東区新砂1-9-15)
E-mail: takasaki@doboku.metro.tokyo.jp

1989年4月から2000年3月まで東京都より井の頭公園内において地下水位観測が行われてきた。平成19年6月からは明星大学により地下水位、池水位、降雨量の観測が行われている。本研究ではこれらの資料を整理し、降雨量と地下水位変化との対応関係について、数年に一度程度で出現する井の頭池の湧水との観点から考察した。その結果、過去1ヶ月間の降水量が極めて多い場合、あるいは過去1年間の降水量が多いと同時に過去1ヶ月間の降水量も多い場合において湧水が発生する可能性があることが示された。さらに池の水循環プロセスを把握することを念頭におき、水循環モデルを用いた地下水位変動解析を行った。水循環モデルは安藤等¹⁾の地下水涵養・地下水流出モデルとDiskin-Nazimovの雨水浸透モデルを組み合わせた。解析は1989年から約20年間と2007年から約2年間の2つの期間に分けて行い、両者とも概ね再現性が示された。

Key Words : Inokashira Pond, ground water level, spring, hydrological cycle analysis

1. はじめに

井の頭池周辺にひろがる縄文期の竪穴式住居などの遺跡群や神田上水の水源として生活用水を江戸に供給していたことは井の頭池が歴史的に安定して生活用水が得られる場所であったことを表している。昭和30年頃までは豊富な湧水により池水が満たされていたが、その後、周辺地域の都市化や地下水利用のため池水は減少し続け、昭和38年には完全に枯渇した。以来、ポンプによる地下水揚水を行い池水を人工補給している。湧水の枯渇は池の水質、生態系に大きな変化をもたらし、透視度の悪化やアオコの発生など池の環境問題として取りざたされている。井の頭公園は、歴史的、文化的価値のある公園として多くの市民に利用されており、公園の中心的存在である池への関心も高い。現在、地元NPOや東京都、武蔵野市、三鷹市などの自治体、商工会議所、報道機関により「井の頭恩賜公園100年実行委員会」が組織され、開園100年にあたる2017年に向けて井の頭池を再生させる様々な活動や取り組みが行われている。そのような中、本研究は井の頭池の水質改善、湧水保全の基礎的研究として池の水循環機構の解明することを念頭におき、降雨に対する地下水位変化について特徴を示し、大雨後の湧

水発生と関係について考察することを目的とする。さらに安藤等の地下水涵養・地下水流出モデル¹⁾とDiskin-Nazimovの雨水浸透モデル²⁾を組み合わせた水循環モデルを用いて地下水位変動解析を行い、モデルの再現性について検討することをもう一つの目的とする。降雨に対する地下水位変化の特徴を知り、そして再現性の良い水循環モデルを構築することは、適切な池水管理が行えることに結び付く。

2. 井の頭池の概要

(1) 井の頭池周辺の地形・地質

武蔵野台地の青梅付近を扇頂として古多摩川の土砂が堆積して出来た扇状地が東部に向かって傾斜しており、その上を厚さ5~10mの関東ロームが覆っている。下部は武蔵野礫層や立川礫層などの段丘砂礫層が発達し帯水層を形成している。武蔵野台地周縁部には井の頭池をはじめ善福寺池、妙正寺池、三宝寺池など神田川、石神井川の水源となる池が存在し、これらは帯水層から流出する豊富な湧水により形成されたと考えられている^{3)、4)}。次に井の頭池付近の地形、地質を東京都土木技術支援・人材育成センターの地質断面図⁵⁾から見ると、関東ロ

ーム、武蔵野礫層、砂、粘性土が複雑に入り組んだ層になっている。このような複雑な地形、地質のため井の頭池付近にいくつもの湧水が集中し、水量豊かな池を形成していたと考えられる。

(2) 井の頭池の概要

井の頭池周辺には大川がないため洪水の恐れはない。そして豊富な湧水をたたえた池が存在していたことから、「水」を視点とするならばこの地域は安定して生活水が得られ安心して暮らせる土地であったことが推測できる。井の頭池の北西側の崖線上の高台には縄文期の御殿山遺跡群がある。江戸期においては寛永年間（1630年頃）に江戸の人口は約15万人に達し、大久保藤五郎が江戸の生活用水確保のため井の頭池を源泉とする神田上水を開発している。近代になり大正6年（1917年）には皇室の御料地が東京市に下賜され井の頭恩賜公園として開園した。以来、井の頭恩賜公園は池を中心的存在として発展し、多くの市民に親しまれている。一方で井の頭池の水量は昭和30年頃から減少し、昭和38年に枯渇して以来、浅層地下水、深層地下水を揚水して池水を人工補給している。現在の補給量は、揚程20mから90mの8本の井戸により約3,600m³/日ある。井の頭池は北西を東南に向けたY字の形状をしており、それぞれ弁天池、お茶の水池、ボート池に分かれている（図-1）。池面積は4.2ha、池貯留量は約69,000m³、平均水深約1.6mである。池は夏には藍藻が繁殖し緑色に、冬には珪藻が繁殖し茶色に濁り、藻類が年間を通して繁殖している。しかし、数年に一度の大雨後に湧水が出現している。湧水は池底から湧出するため池の透視度を基に目視により確認するほかない。近年では2004年と2008年に湧水が確認されており、2004年には弁天池やお茶の水池の上端が清水状態になった。2008年は弁天池上端が日により若干透明になる程度であった。

(3) 水文観測資料

1989年4月から2000年3月まで東京都により井の頭公園の地下水実態調査が行われた⁶⁾など。2007年6月からは明星大学により管理事務所の井戸水位、池水位、降雨量

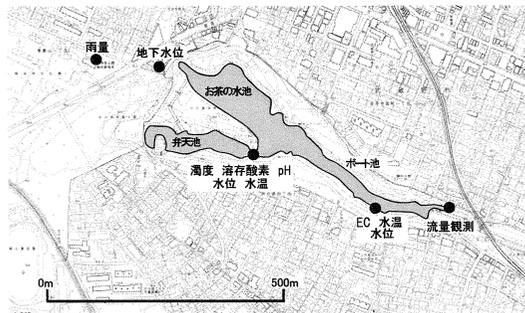


図-1 井の頭池の概要図

の観測を行っており、さらに2008年9月からは井の頭池の水素イオン濃度、濁度、溶存酸素などの水質の連続観測も行っている。地下水位の観測地点は図-1中に示す“地下水位”の位置で公園管理事務所の井戸である。1989年4月から2000年3月までの11年間は毎日0時の日単位の観測値である。2007年6月からは30分単位の観測値である。なお2000年4月から2007年5月まで約7年間は地下水位観測は行われていないため、東京都の地盤沈下観測井の三鷹観測所のデータを管理事務所井戸の地下水位に標高変換して用いる。降雨量については1988年4月から2007年5月まではアメダス練馬の観測値を用い、2007年6月からは図-1中に示す“雨量”地点の東京都西部公園緑地事務所の屋上に設置した雨量計の観測値を用いる。

3. 降雨量と地下水位変化の関係

(1) 過去20年間の降水量と地下水位の変化

1989年から2008年までの練馬アメダスの年降水量と月降水量を図-2に示す。年降水量については、最大が1991年で年間2,015mm、最小が1994年で1,127mm、20年間の平均値は1,597mmである。月降水量については、最大が2004年10月で783mmであり、最小が1995年12月で0mmである。関東地方の場合、冬期と夏期では降水量が大きく異なるが、図-2で見ると2004年10月の783mmは突出している。一方、地下水位変化について1989年4月から2009年2月までの管理事務所の井戸の値を図-3に示す。過去20年間で池の透視度が高く湧水が確認された期間は、1991年9月、1998年8月、9月、2004年10月下旬～11月上旬とされている。また、2008年9月、10月にもしばしば弁天池上端が透明になった。2004年と1991年は月降水量と地下水位高が1位と2位の値であり、一方、1998年、2008年は月降水量、地下水位高は特に大きい値ではないが、年降水量が多く、年間の地下水高も高い。湧水が出現する条件を簡単に簡単に整理すると、①過去1ヶ月間の降水量が極めて多い、②過去1年間の降水量が多いと同時に過去1ヶ月間の降水量も多いこと、が言える。

(2) 近年の降水量と地下水位変化

2007年6月6日より開始した新たな機器による管理事務所井戸の30分単位の地下水位と西部公園緑地事務所屋上の雨量の観測値の2009年8月28日までの値を図-4に示す。2007年、2009年に比べ2008年の地下水位は高く、特に2008年9月、10月の地下水位は標高46.3m付近で一定を保っている。池水面の標高が45.8m付近であるから管理事務所の地下水位は池水面よりおよそ50cm程度高い。この時期にしばしば弁天池が透明になっている。透明になった期間は半日から数日程度とごく僅かであるが、

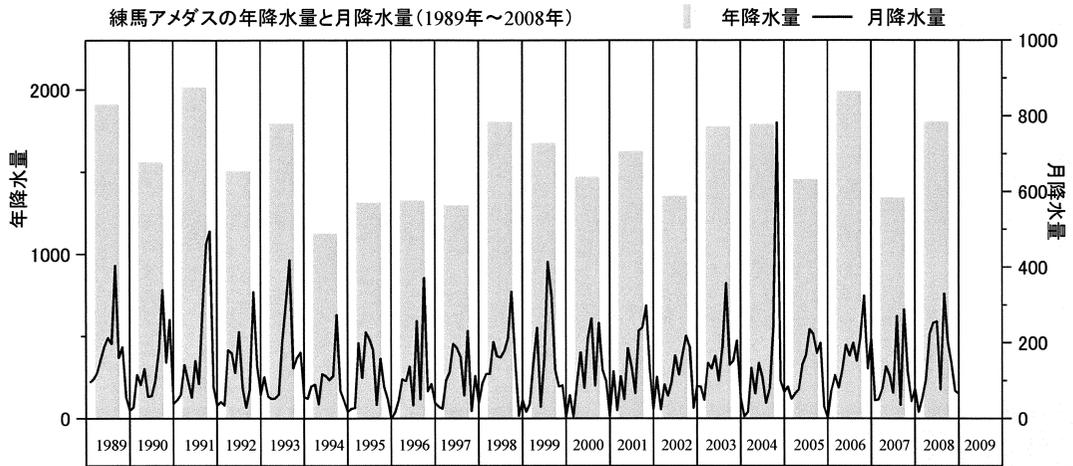


図2 過去 20 年間の練馬アメダスの年降水量と月降水量

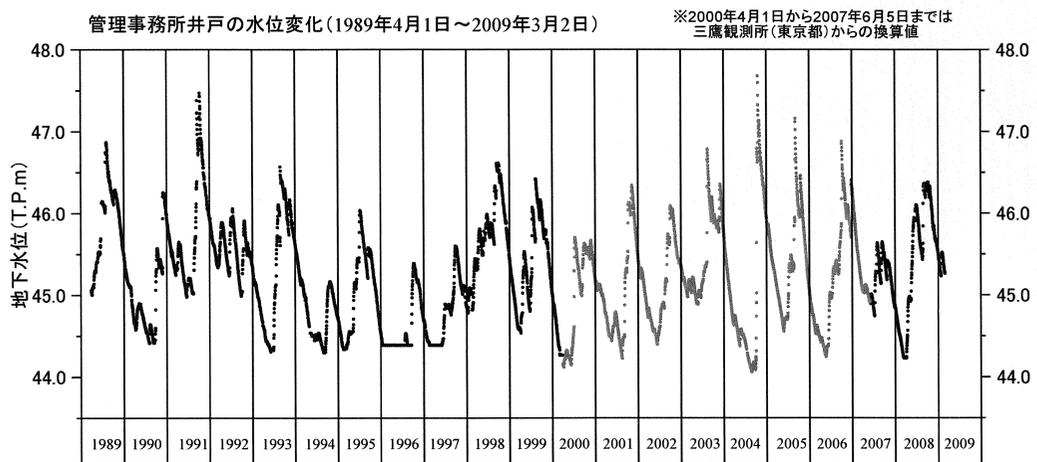


図3 過去 20 年間の管理事務所井戸の地下水水位変化

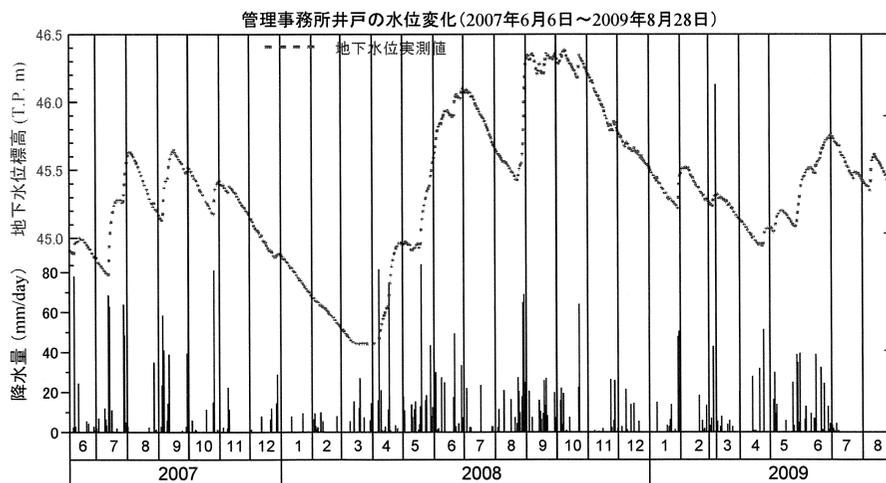


図4 近年の降水量と地下水水位

湧水が出現している可能性が高い。この期間の弁天池の状況から、湧水が出現し若干でも池が透明になる地下水水位標高は46.3m付近であると考えられる。

4. 地下水水位変動解析

(1) 水循環モデルの概要

本研究で用いる水循環モデルの構造はDiskin-Nazimovの雨水浸透モデル、安藤等の地下水涵養モデル、地下水流出モデルから構成される。当初、安藤等¹⁾が水循環モデルが提案されたが、その後、安藤・藤村・荒井⁷⁾および藤村・安藤⁸⁾により改良された。モデルのフロー図を図-5に示す。まず、Diskin-Nazimovモデルにより1時間雨量から土地利用別に表層浸透能(f)を算定し、そして不飽和帯への浸透量(g)と直接流出量(D)を算定する。次に、消失量として蒸発散量(E)と地下水涵養量(G)を考える。実際の蒸発散は表層から行われているが、蒸発散と土壌の浸透能との関係は解明されておらず、Diskin-Nazimovモデルに組み込むことは困難なので、従来のモデルの通り不飽和帯の水分量から蒸発散量(E)を差し引く。蒸発散量の算定は、1時間毎の気温から飽和水蒸気量を求め、それをHamon式に代入し1日当たりの蒸発散量を計算し、そして1時間あたりの蒸発散量に換算する。不飽和帯からの地下水涵養は、不飽和帯の水分保留量(Ms)が最小容水量(Mn)より小さいときは行われず、大きいときにはその超過保留量(Ms'-Mn)に比例定数βを乗じた量とし、超過保留量がある一定値hを超えたときには地下水涵養能で涵養される。

(2) 解析結果

前述の水循環モデルを用いて地下水水位解析を行う。解析対象期間は1989年4月1日から2009年7月14日までの20年2カ月と2007年6月6日から2009年7月14日までの2年1カ月の2期間を分けて行う。これは地下水水位観測が時間単位が日単位と30分単位で異なること、そして雨量データの観測地点も練馬と井の頭公園内と異なることなど観測条件が違っているため区別した。計算結果は公園管理事務所の井戸の地下水水位標高(T.P. m)とモデル計算値である地下水貯留量(mm)のハイドログラフの波形で検討した。それは本モデルは地下水水位標高を直接表す構造ではないが、地下水水位は土壌中の空隙部分を上下し、一方、地下水貯留量は土壌の固体部分を除いて単純に水量として見なした高さであり、地下水水位の変化と地下水貯留量の変化はほぼ一致すると考えたためである。

a) 1989年から2009年まで約20年間の解析

図-6には降雨量を縦棒グラフで表し、計算値である地下水貯留量と実測値である公園管理事務所の井戸の地下水水位標高の変化を降雨量の上部に示す。地下水貯留量

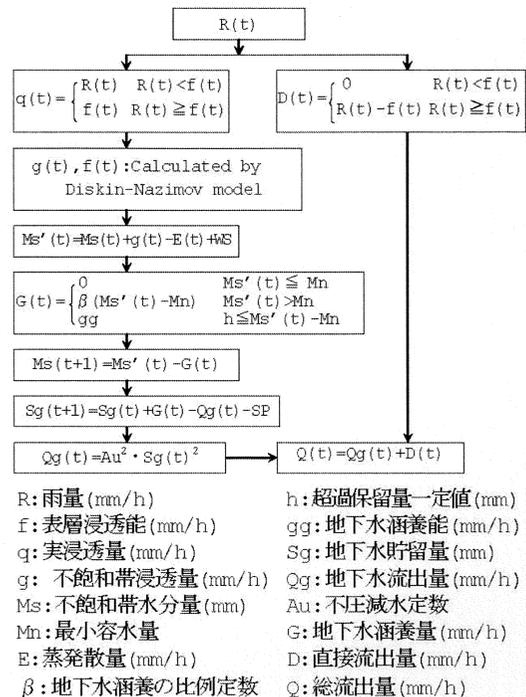


図-5 水循環解析のフロー図

表-1 モデルパラメータの諸数値

パラメータ	記号	数値
不圧減水定数	Au	0.0025
最小容水量	Mn	100.0mm
地下水涵養の定数	β	0.30
蒸発散の補正係数	e	0.55
終期浸透能	f _c	11.3mm/h
表層水分量最大値	sm	50.0mm

(計算値)は地下水水位(実測値)とほぼ同じ挙動をしている。20年間の解析において地下水水位変動の再現性が概ね表し、水循環モデルが井の頭池の地下水涵養域に適用可能性があることが示された。このうち終期浸透能は

b) 2007年から2009年まで約2年間の解析

図-7には解析結果を示す。特徴として地下水水位が上昇へ転じる変化はある時点を境として明確に現れており、上昇は10日程度続いている。一方、上昇から下降に向かう変化は連続的な曲線で現れている。さらに、降雨に対する地下水水位の反応は、まとまった降雨であれば比較的短い時間で生じている。これは雨水の地中への浸透が早く、また地下水涵養域は井の頭池に近い領域であることが考えられる。解析結果では、6月から10月まで計算値である地下水貯留量は実測の地下水水位の変動を良好に再現しているが、11月以降においてズレが顕著に見られる。考えられる要因の一つとして蒸発散量の算定が正確に行えていない可能性がある。本研究ではハモン式を用いて

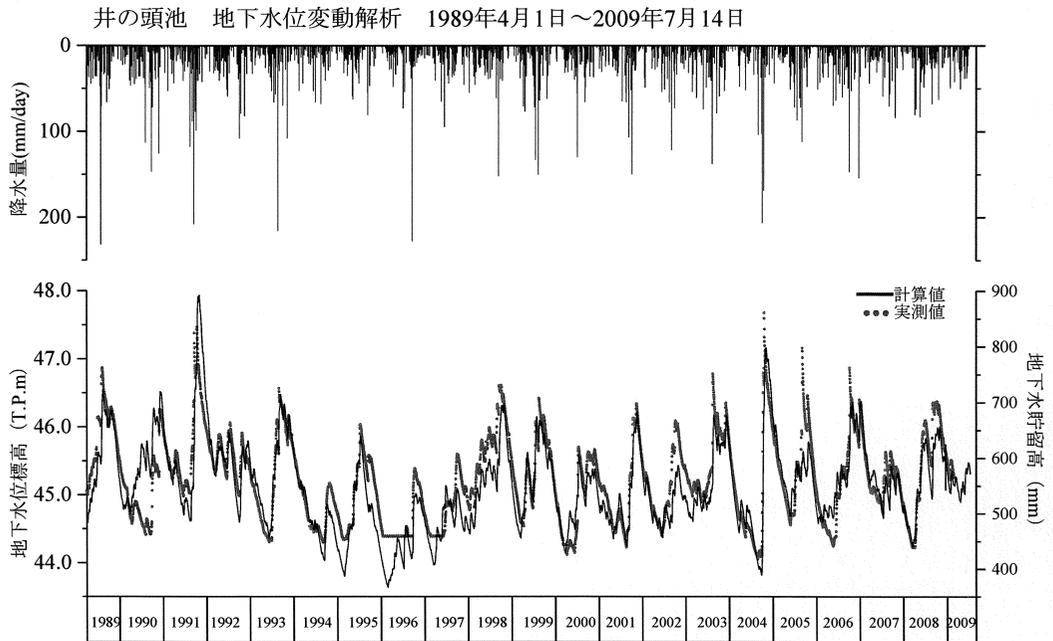


図-6 地下水位変動解析結果 (過去20年間)

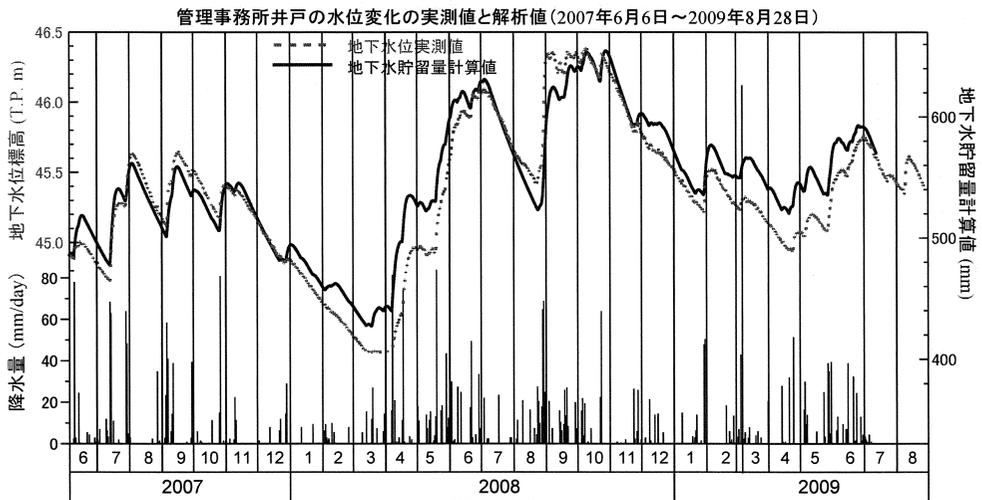


図-7 地下水位変動解析結果 (過去2年間)

いるが、ハモン式は気温と日照時間の関数であり冬季では非常に小さな値になってしまう。関東において冬季は湿度が低く乾燥状態が続くため、実際の蒸発量はさらに多いと考えられる。本研究では地下水涵養域が確定的でないと考えたため、地下水涵養域内の浸透域と不浸透域の割合は試算により与えた。その結果、浸透域は65%であり、不浸透域は35%となった。井の頭池周辺は市街化されているが公園緑地も広がっており、この値は妥当

であると考えられる。その他、解析で用いたモデルパラメータを表-1に示す。これらのパラメータの値は武蔵野台地や多摩丘陵など関東ロームで覆われた流域に適用された値^{7)、8)}を参考として決定した。

c) 有効空隙率

有効空隙率は土質試験により求めてそれを解析に用いることが多い。しかし、本研究では解析対象範囲を地下水涵養域として捉えており、土地利用が多様であり、解

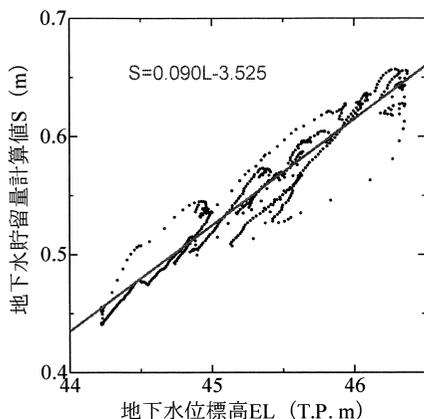


図-8 有効空隙率

析範囲を代表するような土質のサンプリング試験を行うことは困難である。従って本研究では逆に地下水位変動解析により推定した。図-8は地下水貯留量の計算値と管理事務所の地下水位の相関関係であり直線近似を行った。この図における傾きが0.090であることは対象地域の有効空隙率が9%程度と考えられる。武蔵野台地の有効空隙率が5%~15%と言われており妥当な値を示している。

5. まとめと今後の課題

本研究では井の頭池の湧水出現は過去1年および過去1カ月の雨量の多寡によること、そして地下水位標高が46.3mに近づくと出現する可能性があることを示唆した。さらに水循環モデルによる1時間単位の地下水位変動解析では、降雨に対する地下水位変化を概ね再現することができた。

井の頭池の水質改善、湧水保全のためには、まず池の現状を把握し、それに基づいて対策を検討し、対策を実行する必要がある。その方法は従来の学問領域を超えて実施されることが重要である。本研究は水文学的な面から水収支把握を主眼として進めたが、今後は、水質、微

生物学的分野からも展開し、池の水収支と水質特性の把握、藻類繁殖のプロセスの解明と繁殖抑制の検討、さらに入水水および池水の水質浄化等の検討を考えている。

本研究は東京都西部公園緑地事務所、東京都土木技術支援・人材育成センターおよび明星大学との「井の頭恩賜公園池の水質改善・湧水保全に関する共同研究」の一環として行われた。関係各位に記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 安藤義久、高橋裕、田口隆男:台地の小試験流域における地下水流動を含む地下水流出解析、第28回水理講演会論文集、pp.515-520、1984。
- 2) Diskin, M. H. and Nazimov, N.: Linear reservoir with feedback regulated inlet as a model for the infiltration process, J. Hydrology, Vol.172, pp.313-330, 1995.
- 3) 貝塚爽平:4 武蔵野台地西部の地形と地質、II 武蔵野台地の土地と水、東京の自然史増補第二版、紀伊國屋書店、pp.55-60、1979。
- 4) 国分邦紀、土屋十園:東京の地下水と水循環について、水文・水資源学会誌、Vol.16、No.3、pp.289-300、2003。
- 5) 東京都土木技術支援・人材育成センター:東京都中央部地質断面図の断面位置メッシュ番号 34(60-65)、35(60-65)、36(60-65)、<http://doboku.metro.tokyo.jp/start/03-jyuhou/danmenzu/menu2.html> (参照:2009/8/31)。
- 6) 東京都西部公園緑地事務所、憐日さく:井の頭恩賜公園地下水実態調査委託報告書、平成元年10月、1989。
- 7) 安藤義久・藤村和正・荒井竜司:武蔵野台地の湧泉の水循環解析と流域管理、水工学論文集第40巻、pp.225-230、1996。
- 8) 藤村和正・安藤義久:表層浸透能の変化を考慮した多摩丘陵都市流域における水循環解析、水工学論文集第46巻、pp.271-276、2002。

RELATIONSHIP BETWEEN RAINFALL AND GROUNDWATER LEVEL AT INOKASHIRA POND

Kazumasa FUJIMURA and Tadakatsu TAKASAKI

This study investigate the relationship between rainfall and groundwater level at Inokashira Pond, and the hydrological cycle analysis is performed for the term of about 20 years and recent 2 years. Inokashira Pond is in the Inokashira Park which located in an urban area developed in the Musashino upland, in the western suburbs of Tokyo. The spring of Inokashira Pond appears sometime in several years when rain falls many in a year and rain falls heavily in a month. The results of hydrological cycle analysis showed that the calculated hydrographs of groundwater storage roughly represent the observed hydrographs of groundwater level for long-term and short-term.