

16. 大雨により復活した台地の湧水・地下水についての水文学的考察

A Hydrological Study of Ground-water and Springs on Musashino-upland by the Heavy Rainfall

地象部 国分邦紀

1. はじめに

平成 16 年秋期は、新潟県中越地震による地震災害が衝撃的であったが、度重なる台風や大雨により新潟県や福井県をはじめ、全国各地で水害が頻発した年でもある。東京地方では目立った水害はなかったものの、記録的な累積降雨により枯渇した湧水や都市河川の流量復活、地下水位上昇などが話題となりマスコミでも採り上げられた。

本報告は、東京の西部、武蔵野台地の中央部に位置し、大雨の時だけ復活するという「さいかち窪湧水」と神田川の源である「井の頭池」で久しぶりに観測された湧水について、水文学的考察を行ったものである。

2. 小平霊園・さいかち窪の湧水

小平霊園は、東村山・小平・東久留米の三市にまたがる総面積約 65.3ha の公園墓地で、武蔵野の雑木林を切り開いて整備された。その北東隅に、墓地として利用されず残った面積約 2.5ha の馬蹄形窪地「さいかち窪」がある。ここは一級河川黒目川の源流の谷頭で、ふだんは湧水が見られることはない窪地であるが、大雨が続いたときに数年に 1 回現れるという湧水である。ここで、平成 16 年 10 月下旬～11 月上旬に 6 年ぶりという湧水が観測された。西部公園緑地事務所では水位測定を開始したが、土研もこれを支援することになった。

(1) 地形・地質¹⁾

小平霊園のある付近は、地形的には標高 70m 程の



図—1 小平霊園付近の地形

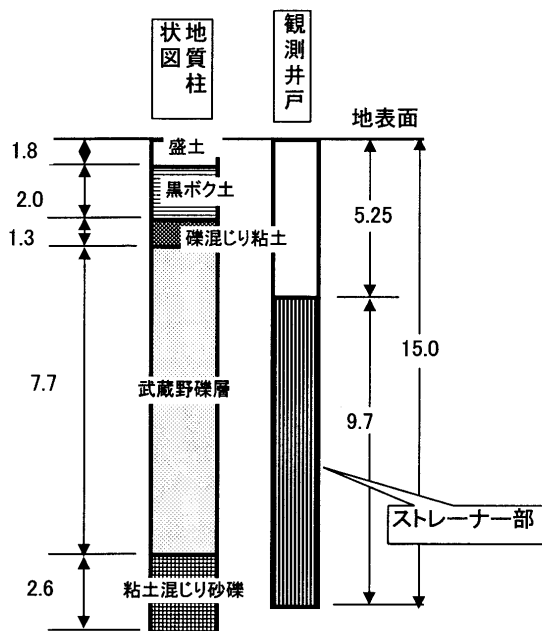


図—2 さいかち窪位置図

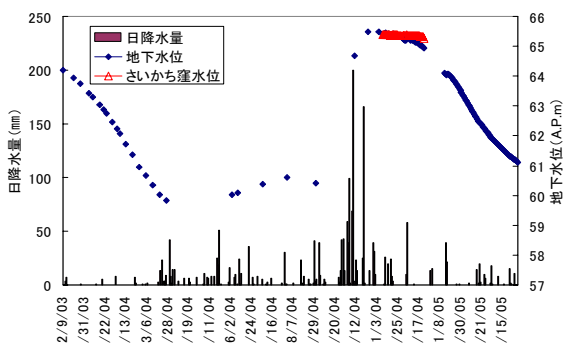
武蔵野段丘と呼ぶ平坦な台地のほぼ中央部にあ

る。ここは古多摩川の扇状地として形成され、その後上部を関東ローム層に覆われたとされるが、付近の台地上には谷状または長円形の浅い窪地が多数ある(図—1、図—2 参照)。対象地は、黒目川の上流部の浅い谷を盛土整地した地盤である。

地質構成は層厚約 10m の武蔵野礫層とこれを覆うローム層からなるが、浅い谷状の窪地ではローム層の下に黒ボク土が堆積し、調査地ではローム層は欠損している。図—3 は窪地北西部に設置した観測井(深さ 15m)と地質柱状図である。黒ボク土層の下位の礫混じり粘土、武蔵野礫層、粘土混じり砂礫層上部は透水性が良好で主帯水層である(透水係数 $k=1.2 \times 10^{-2} \sim 1.3 \times 10^{-3}$ cm/sec)。また上位黒ボク土層は粘土質で透水性が悪く、大雨があると水を貯



図—3 地質柱状図と観測井構造



図—4 観測井水位と湛水池水位

留しやすい。黒ボク土層の上部に貯まる水は宙水的特徴を有する。

(2) 地下水位と湛水池の水位

図—4 は 2003 年 12 月～2005 年 3 月末までの観測井水位変動と湛水池の水位を示した図である。地下水位の季節変化は大きな曲線を描き緩やかな変動をしている。変動幅は A.P.59.8m～65.5m (地表面下 -8.2m～-2.5m) の約 6m である。注目は 2004 年 9 月から 10 月にかけての地下水位の急上昇と数年ぶりという湧水の復活である。この時の累加降雨は 9 月 24 日から湧水が確認された 10 月 25 日までで実に約 823 mm というもので、東京の年間平均降水量の半分以上を超える雨量がわずか 1 ヶ月の間に降ったことである。そして、地下水位の高い時期と多量の湧水による池は約 2 ヶ月間続いた。写真—1 はこの時のさいかち窪の湧水によって出来た池の様子である。

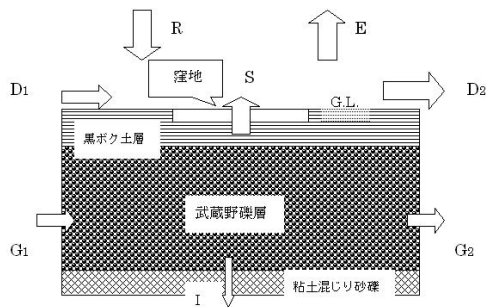
(3) 湧水期間の水収支

水収支は少なくとも 1 年を通した日単位の計算が望ましい。しかし、当地に観測井が設置されたのは 2003 年 12 月で、それまで自記水位計が設置されなかったため、降雨と地下水位の関係の解明にはデータ不足である。また窪地の表面水流入量の実測値も得られてない。したがってここでは、さいかち窪に湧水が観測された期間の水収支を報告する。

さいかち窪の流域面積は下水道の排水系統図から約 85.8ha である。また水収支対象期間は 2004 年 10 月 25 日～12 月 23 日の 60 日間である。この間の降水量 R は計 245 mm である。次に、池の出口から下流の黒目川への平均流出量 D_2 は、内径 ϕ 1,350 mm の鉄筋コンクリート排水管の約 1/4 水深で流れて



写真—1 さいかち窪に現れた湧水池



図—5 水収支概念（さいかち窪）

いたとの情報から、Manning の式を用いて算出し $Q=0.115\text{m}^3/\text{sec}$ を得た（ここで、粗度係数 $n=0.013$ 、管の縦断勾配 $i=0.00024$ を使用）。この流出状態が 2 ヶ月継続したとして黒目川への総流出量は約 $622,000\text{m}^3$ である（流出高に換算し 725mm ）。また蒸発散量 E は、東京多摩地区における過去の小型蒸発計の平均値から^{2),3)}11月、12月の日蒸発散量を 1.2mm/day と仮定し、この間の計蒸発散量を $E=72\text{mm}$ と見積もった。

水収支概念を示したのが図—5 である。なお対象期間では武蔵野礫層が完全に地下水で飽和され一時的に被圧状態となり、上位黒ボク土層上部に湧水が湧出したと考えられ、地表からの地下水浸透はないと思われる。よって降水量から蒸発散量を差し引いた残り成分は全て表面流出分であり 173mm である。窪地からの湧出量 S は、さきに求めた黒目川への総流出量 725mm から表面流出量 $D_1=173\text{mm}$ を差し引いた残り 552mm である。これは、平均して $0.09\text{m}^3/\text{sec}$ ($5.5\text{m}^3/\text{分}$) の湧水量にあたる。

3. 井の頭池の湧水復活

平成 16 年 10 月下旬から 11 月上旬にかけ、それまでの度重なる台風や大雨により、神田川の源頭水源である「井の頭池」で久しぶりに池底からの湧水がみられた。西部公園緑地事務所によれば池の水が清水状態になったことは、過去 20 年間で平成 16 年を含め、1991 年 9 月、1998 年 8,9 月の 3 回ほどであるとのことである。

本報告では、以上の経緯を踏まえて今回西部公園緑地事務所が行った湧水調査⁴⁾と過去の地下水調査

5),6)を再整理し、水収支的に考察を加えたものである。

(1). 地形・地質と井の頭池の概要

井の頭公園は武蔵野台地の東部に位置する。この台地の標高約 50m の南北の線上には東に向かう開析谷の谷頭が多く、地下水が湧出して池をつくっている（図—6 参照）。石神井川の三宝寺池、石神井池、神田川水系の善福寺池、妙正寺池、井の頭池などがほぼ南北線上の谷頭に分布している。ここに湧水が多くみられるのは、武蔵野段丘はこの付近で勾配が緩くなり、段丘砂礫層を帯水層とする地下水が地下水面勾配が緩くなって湧出しやすいためと、貝塚は指摘している⁷⁾。

この公園は、武蔵野市・三鷹市にまたがり、1912 年（大正 2 年）に日本最初の郊外公園として整備された面積約 37ha の都市公園である⁸⁾。その中心が井の頭池で Y 字型をしており、お茶の水池・弁天池・ボート池からなり、池面積約 $S=43,000\text{m}^2$ である。その名前は、昔、徳川家康がこの地を訪れ、茶の湯に用いたことに由来すると伝えられる。しかし、昭和 30 年頃から地下水位が低下し、自然の湧水は枯渇した。現在では池水の維持のために深井戸から地下水を汲み上げている現状にある。



図—6 井の頭池付近の地形

地質は、武蔵野ローム層が表層から約 $9\sim 10\text{m}$ 、その下に武蔵野礫層が約 5m 、粘土層がところどころに挟在してまた砂礫層が続く構造である。

(2). 復活した湧水と池の水質

西部公園緑地事務所では、池底からの湧水が顕著に見られた平成 16 年 10 月 28 日と 11 月 12 日の両



図—7 湧水が確認された部分（着色部）

表—1 井の頭池の湧水水質

	弁財天側	お茶の水側
pH	6.4	6.7
電気伝導度mS/m	28.9	30
濁度	1.7	3.7
水温 °C	16	16.5
平均水深 m	1.47	1.2

※ 平成16年10月28日測定



写真—2 湧水が復活した井の頭池

日、池からの流出量（池底からの湧水量）、池水の水質調査を行った。

池の湧水量は池流末（水門橋下流）で流量観測により測定したもので、

1 回目：10月28日…0.12m³/sec

2 回目：11月12日…0.15m³/sec

である。なお、このときの池への地下水補給量が約0.016 m³/secであることから、流出水のほとんどは湧水である。

また同時に10月28日には図—7に示す池西部の

お茶の水側と弁財天側において水質調査を実施した。調査は、池にボートを浮かべ、各池を基盤の目状に細かくメッシュ区分し、弁財天側池 20 点、お茶の水側池 27 点のポイントで簡易水質調査を行ったものである。水質調査項目は、pH、電気伝導度、濁度、水温、水深、池底の目視である。

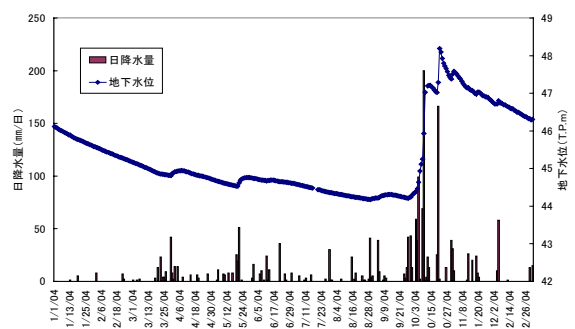
水質調査の結果の平均値は表—1 のとおりで極めて良好である。筆者も10月28日に現地を調査したが、池水が澄んで透明度も高いのに驚いた（写真—2）。

(3). 地下水位の状況

平成16年9月末からの雨は記録的な数字で、気象庁府中アメダスの昨年10月の降水量は785 mmである。図—8は池から約700m南西にある当所、三鷹浅井戸（深さ15m）の水位記録で、9月末から約半月の間に約4mも水位が上昇している。池水面標高はT.P.45.8m、園路標高も約T.P.45.6mであるから平成16年の場合、地下水位が池水位を上回るのは10月中旬～12月の約2ヶ月半である。

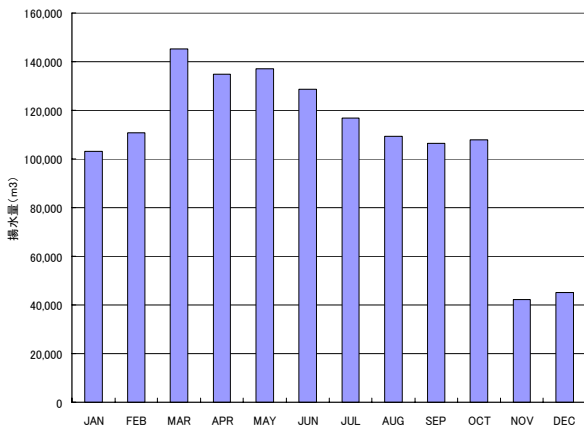
(4). 井の頭池の地下水補給量

冒頭に述べたように、井の頭池では現在池水の維持のために約3,500m³/日の地下水を園内8個所の井戸から汲み上げて補給している。逆に言えば、これだけの地下水を揚水しない限り水面が低下し神田川

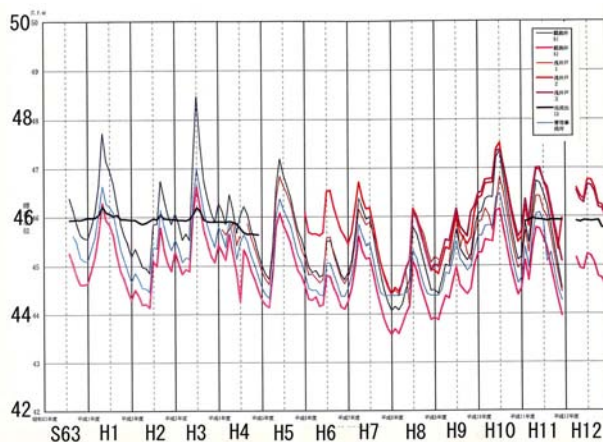


図—8 平成16年浅井戸水位（三鷹）

の流水も保持出来ないということになる。晴天時の神田川流量は池尻出口付近で約0.04m³/secで、日量にすれば3,456m³/日である事実は地下水揚水によっているといえるのである。



図—9 月別地下水揚水量（平成 16 年）



図—10 長期地下水位観測結果

なお池面積 43,000 m²からすると地下水揚水による池の水位上昇量は計算上約 9 cmである。

図—9 に示したのは、昨年、平成 16 年の月別池補給地下水揚水量である。池に自然湧水が復活した 11 月と 12 月は武蔵野市分の 4 本の揚水井戸を停止したので、この 2 ヶ月は例月揚水量の半分以下の揚水（約 1,400 m³/日）で済んだのがわかる。

(5). 井の頭池の長期水収支

井の頭池では過去、長期間にわたり地下水実態調査を行っていた（平成 12 年度まで）。観測井による地下水位の自記観測、池の流出量自記観測、雨量・蒸発量などの連続観測である。

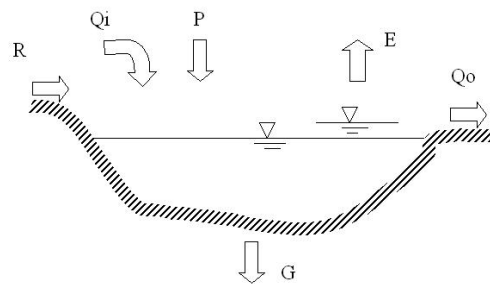
ここでは、平成 2 年度に実施した池の水収支⁶⁾について紹介し、それと比較し昨年観測された自然湧水復活の水文学的検証を試みることにする。

1). 地下水位の長期観測結果

図—10 は昭和 63 年(1988)12 月～平成 13 年(2001)3 月まで 12 年余の地下水位測定結果を示す。グラフ中、一番下の折れ線が池に最も近い観測井 B-2 の水位記録である。この間、地下水位のほうが池水位 T. P. 45.8m より高い時期は、平成元年 8 月～10 月、平成 3 年 8 月～11 月、平成 5 年 9 月～10 月、平成 10 年 9～10 月の、全体でも 11 ヶ月に過ぎない。この期間は例月に比べ降水量が多かったため地下水位が高かったと思われる。

2). 池の水収支式

なお、以下の水収支では水収支領域を池のみに限定しており流域面積は考慮していない（本来は表面流入の集水面積があるはずであるので若干問題がある）。



図—11 井の頭池の水収支概念

池水量は、水収支計算により、流入・流出量の関係を定量的に把握し、地下水との関係も検討可能である。

池水収支式は下記に示すとおりである。

$$\Delta V = Q_i + (P \cdot S) + R - (E \cdot S) - Q_o \pm G \quad \dots\dots (1)$$

ここに、

ΔV : 池の貯水量変化

Q_i : 池補給水量（地下水）

P : 降水量

R : 表面流入量

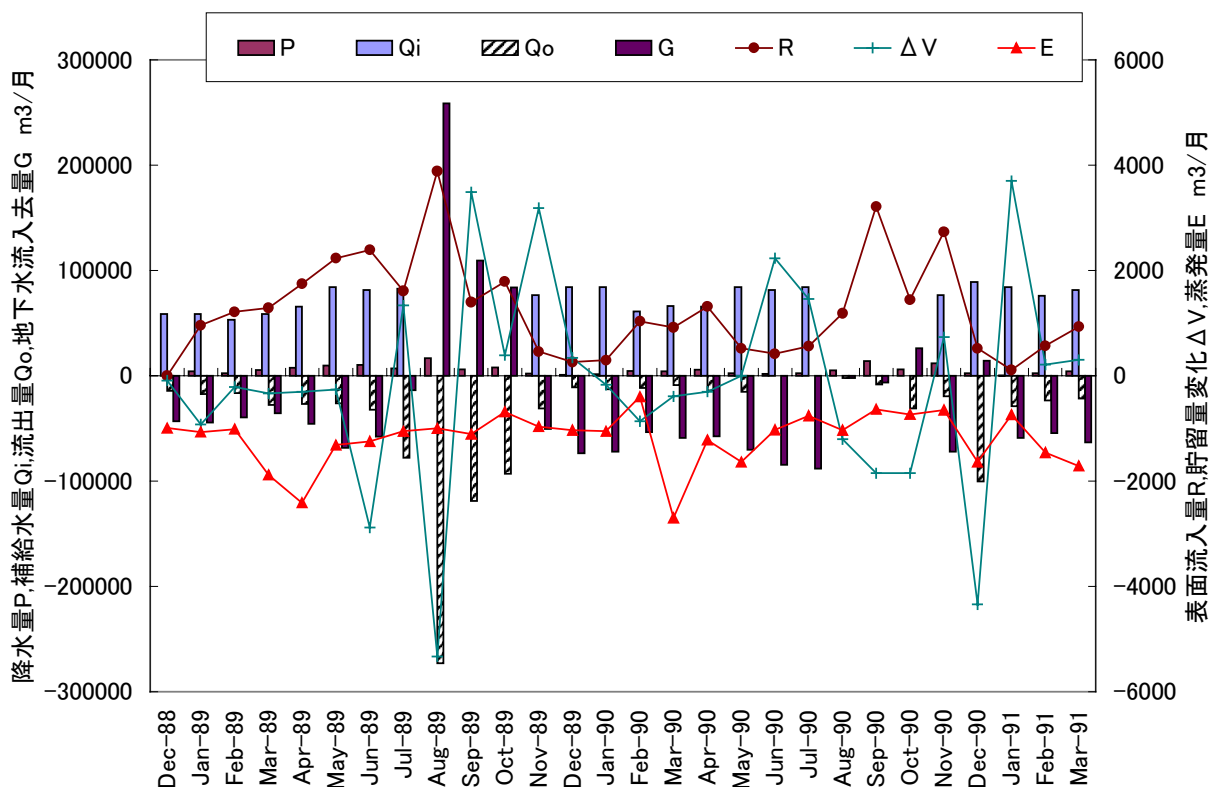
E : 蒸発量

Q_o : 流出量

G : 地下水流入流出量

S : 池の面積

水収支の概念は図—11 に示すもので、 ΔV は池の



図—12 井の頭池の長期水収支結果

水位観測結果、Pは管理事務所屋上での降水量記録、Eは蒸発計観測記録（水面蒸発量）、Qoは池尻での流出量を用いている。なお池への表面流入量Rについては実測値がないため、期間中の降雨量・池流出量・池水位のある洪水の観測結果（平成元年6月16日16:00～翌17日4:00）から逆算で求めている。そしてこの時の表面流入量が池に降った総雨量に占める比率 f ($f=0.23$)を求め、以後の計算は降雨量に f を乗じて算出している。その後上式で未知項目の地下水流入流出量Gを求めている。

3). 水収支結果

上記(1)式を用いて、昭和63年12月から平成3年3月まで月単位の水収支を行った結果が図—12に示すものである。なお単位はすべて m^3 である。

この水収支グラフ中、1989年8月～10月および1990年10月、12月については計算上地下水湧出がある結果となっている。これは、実際、1989年8月～10月の3ヶ月間は地下水位のほうが池水位より高い観測結果と符合するので湧出はやはりあったと推定される。結果をみてわかるように、池の水収支結果に大きく影響を与えている因子は地下水補給量、



図—13 湧水出現の報道（読売新聞多摩版）

池からの流出量が一番である。これに対し、池内に降る降水量、蒸発量、地表面流入量などは池面積が小規模のため値が小さく水収支に与える影響は少ない。また池の貯留量変化も小さい。

4. 考察とまとめ

平成16年に観察された大雨時の湧水、小平霊園・さいかち窪と井の頭池の二つの事例は、近年地下水や湧水の枯渇が目立つなかで話題を呼んだ。図—13に、さいかち窪の湧き水出現の新聞記事を紹介する。

本報告では現地での実測データに基づき水文解析を試みた。以下に結果に対する考察を行う。

(1). さいかち窪について

①武蔵野台地の中央部に浅い窪地が多くみられることとその成因についてはいくつかの調査がある。

貝塚らは台地上の水害に着目して窪地での湛水が案外多いことを指摘している⁹⁾。そして「ダイダラ坊」などと称される浅い窪地は、地下浅いところ（関東ローム層の直下）に難透水層があり宙水となっているところが多いため、地下への透水が悪いと述べている。また、その成因は宙水があふれ出して地表を浸食し窪地となり下部が粘土化したものと推定している。

②また今回、水収支により求めたさいかち窪の湧水量は約 $5.5\text{m}^3/\text{分}$ であった。これと比較する例に、平成3年10月の大雨による「JR武蔵野線新小平駅水没事故」があり、当時さいかち窪でも異常出水があったとの報告がある。その時の湧水は $4.0\text{m}^3/\text{分}$ で1ヶ月以上続いたと言われ、今回はそれ以上の湧水である¹⁰⁾。

③さいかち窪の観測井自記水位測定は本年にスタートしたばかりである。したがって、今後の課題として大雨時の水位変動特性、黒目川への流出口での実流量測定が是非とも必要である。

(2). 井の頭池について

①平成16年秋期の大雨で観測された湧水の顕著な湧き出し口は、池奥の弁財天側およびお茶の水側であった。またお茶の水側池の北側園路周辺にも数カ所、湧水が噴出した痕跡が見られた。このことから、井の頭池の本来の湧出口はお茶の水側と弁財天側の2箇所が存在することが明らかとなった。なお過去の地質調査などからも明らかのように、この二つの湧水とも、帯水層は武蔵野礫層である。

この時の湧水量、 $0.12\text{m}^3/\text{sec}\sim 0.15\text{m}^3/\text{sec}$ は日量にして $10,400\sim 13,000\text{m}^3$ もあり、通常深井戸から揚水している地下水補給量の約3倍にあたる水量であった。

②井の頭池において地下水位のほうが池水位より高かった期間は、昭和63年12月から平成12年度末までの12年余で11ヶ月である。

過去5回のケースについて、総降水量を調べたところ、平成元年8～10月が 606mm 、平成3年8～11月で $1,132\text{mm}$ 、平成5年9～10月で 232mm 、平成10年9～10月は 490mm と、いずれの場合も降水量が多かった。

③井の頭池の地下水涵養域、表面流出域について井の頭公園の湧水について、その涵養域の規模、範囲を東京都環境局が過去に調査している¹¹⁾。また西部公園緑地事務所でも過去、池周辺の水文環境・地形地質状況を調査してきた。

それらによると、井の頭池はまわりの台地面より約 10m 低い標高 T.P. 46.0m の位置にある窪地である。また地質断面図や地下水位調査などから主帯水層である武蔵野礫層は深度約 10m の位置に連続して分布し、西から東に向かって緩く傾斜している。そして井の頭池の底付近では礫層が現れている。西部公園緑地事務所が調査した地下水断面図によれば、地下水面は全体的に西から東へ約 $1/500$ の緩い勾配で流れていると想定される。

池の涵養域については、池からほぼ西方向へ広がる平均幅 $1,700\text{m}$ 、奥行き約 $4,500\text{m}$ の範囲であり面積は約 8.02km^2 である。この調査では土地利用状況の調査も行っていて、平成8年に行われたもので少し古いデータとなるが、涵養域の被覆率、浸透域率はそれぞれ約 0.8 、 0.2 である。いま、仮に涵養域全体に年間約 $1,500\text{mm}$ の降水量があり、その 20% が浸透したとすると、年に約 $2,400,000\text{m}^3$ の地下浸透量である。地下に浸透した雨水がすべて池の湧水となって湧出したと仮定すると平均約 $6,500\text{m}^3/\text{日}$ の湧水でなければならない。しかし、地下水位が池水位より低い期間が圧倒的に長い現状では無理である。この点、昨年10月の大雨による日量 $10,000\text{m}^3/\text{日}$ を超える湧水がいかに多かったかがわかる。

④新井らによる30年前の水収支調査¹²⁾

西部公園緑地事務所の一連の調査より以前に、1972年～1974年にかけて新井らにより、池の水収支および水質調査が行われている。それによると、当時でも池に補給された地下水の大部分は池底から地中に浸透して神田川への流出はほとんどなく、池底では塵の集積が進行するということがあった。通常

はやはり、池水位より地下水位が低く地下へ浸透して、たまたま長雨のときに周囲の地下水位が上がり一時的に湧水が復活するとの報告であった。

そして新井のまとめた井戸水位と地中の水の入出量との相関図によれば、井戸水位（この観測井戸の場所は明確でないが台地面にあると思われる）が-10.5mより低いときは漏水、逆にそれより高いときは湧出があるとのことであった。相関図だけなのではっきりはわからないが、図から読みとって井戸水位 h と湧出水量 Q の一次回帰式を推定すると、

$$Q \approx 195 \times h + 2,140 \quad \dots\dots (2)$$

ここに、 Q ：湧出水量（ m^3 /日）、 h ：井戸水位（管頭よりの深さ－m）である。

したがって、井戸水面深さが約11mより浅くなると（池水面と同レベルと思われる）池に湧出が生じる結果を示している。

5. おわりに

当所では武蔵野台地の水循環解明の研究を従来行っており、現在都内7地点の民家浅井戸等で地下水・湧水観測を継続している。その結果は本報資料編にも報告しているが、昨年9月下旬からの大雨では軒並み水位が急上昇し、水位のピークはいずれも10月9～10日に観測された。豪雨時の地下水位挙動についての調査研究も興味深いがそれは別の機会に取り上げたい。

資料編の貴重な地下水観測資料は問い合わせも多く一般にもよく使われている。また、我々は設計や工事に伴う地下水・湧水対策の技術支援、調査協力にも取り組んでいるので何か現場での相談があればお気軽に問い合わせさせていただきたい。

最後に、調査にあたり西部公園緑地事務所の関係者の方々に多大なご協力をいただき感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 東京都西部公園緑地事務所(2004)：小平霊園調整池調査・基本設計報告書
- 2) 中山俊雄、国分邦紀(1995)：草花丘陵の水文環境及び地質、平7.都土木技研年報、79-86
- 3) 国分邦紀、中山俊雄(1996)：秋留台地域の水文特性、平8.都土木技研年報、95-106
- 4) 東京都西部公園緑地事務所(2004)：平成16年度井の頭恩賜公園湧水調査報告書
- 5) 東京都西部公園緑地事務所(2001)：井の頭恩賜公園地下水実態調査報告書
- 6) 東京都西部公園緑地事務所(1991)：井の頭恩賜公園地下水実態調査委託報告書
- 7) 貝塚爽平(1979)：東京の自然史（増補第二版）、紀伊国屋書店、67-69
- 8) 前島康彦(1980)：東京公園文庫2、井の頭公園、（財）東京都公園協会
- 9) 貝塚爽平(1979)：東京の自然史（増補第二版）、紀伊国屋書店、74-75
- 10) 東海林隆夫(2003)：武蔵野の古井戸、多摩のあゆみNo.111、たましん地域文化財団、64-69
- 11) 東京都環境保全局(1997)：湧水涵養域評価調査報告書
- 12) 新井 正(1994)：水環境調査の基礎、古今書院、127-130