

2. 1時間データを用いるタンクモデルによる野川の長期流出解析

Long Term Runoff Analysis by SeriesTank Model with Hourly data in the Nogawa River Basin

技術支援課 石原 成幸、○高崎 忠勝（現 河川部管理課）

1. はじめに

多摩川水系の中小河川である野川の上流域では、河道内に流水がなくなる瀬切れがしばしば生じている。野川において流量の確保は大きな課題となっており、地域住民と河川行政から構成される野川流域連絡会では、「なっとく流量」^{1,2)}を設定している。また、建設局では河床への不透水層の設置や湧出水の導水等、流量確保の取り組みを進めている。

河川行政にはこうした取り組みをすすめると共に、その効果を説明することも求められる。流量は過去数か月間の雨の降り方が影響するため、流量確保の取り組み前後それぞれについて降雨と流量の関係(降雨流出特性)を把握し、同条件での流量比較することによって取り組みの効果を定量的に評価することが可能になる。

東京都土木技術研究所では1973年度に野川上流域に水文観測所を設け、以降、水位や流量の観測を続けている。こうした長期間の観測データを用いて降

雨流出特性を解析することで、野川上流域の流量変化や瀬切れ対策の効果を明らかにすることが期待される。本報告では、野川上流域の小金井新橋地点を対象とした長期流出解析について、水文データ、構築したモデル、計算結果等を示す。

2. 対象地点と水文観測

野川は、国分寺市の東恋ヶ窪に源を発し、国分寺崖線の湧水を集めながら崖線下をほぼ南東に流下し、小金井市、三鷹市、調布市、狛江市を経て世田谷区二子玉川付近で多摩川に合流する流域面積69.6km²の一級河川である。

図-1に野川流域と対象地点を示す。対象地点である小金井新橋観測所では水位計による計測と共に流量観測を行っている。流量観測には増水時の流量を観測する高水流量観測と平水時の流量を観測する低水流量観測がある。

小金井新橋で観測した流量を図-2に示す。観測流量の最大は1981年10月22日の13.76m³/sであり、2000年以降についてみると2013年10月16日の4.53m³/sである。低水流量観測において流量が0であったのは、1999年の3月1日、3月24日、2000年の1月28日、2月24日、3月22日、2004年の6月18日、6月30日、7月22日、8月12日、9月16日、2005年の3月10日、6月6日、6月23日、2006年の1月20日、2月27日、3月15日、2008年の2月12日、3月7日、6月17日、2010年の2月22日、2019年1月30日、2月25日である。流量0が観測されたのは2004年を除くと1月から6月の間である。



図-1 対象地点

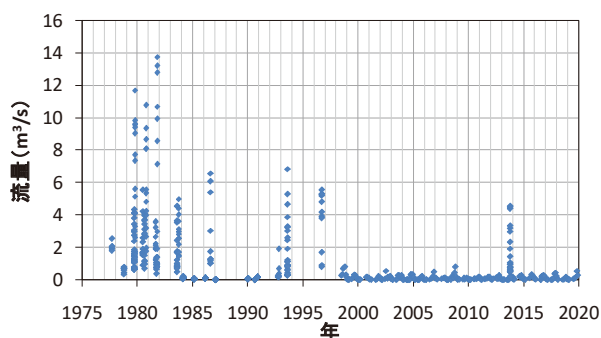


図-2 観測流量

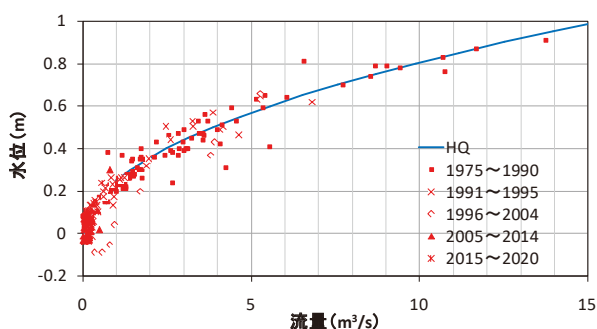


図-3 水位と流量の関係

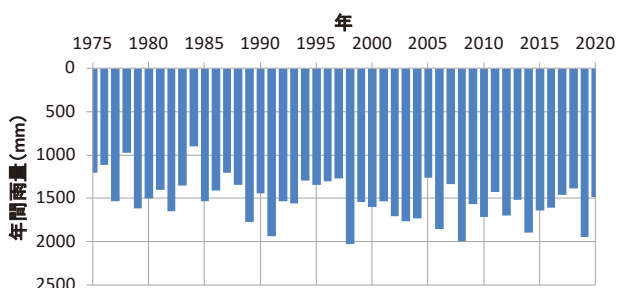


図-4 年間雨量

水位と流量の関係式（水位流量曲線）を求めることにより、水位から流量を推定することができる。図-3に水位と流量の関係を示す。水位データは期間によって基準となる高さが増えるため、各年の水位と流量の関係をもとに水位の補正をおこなった。1975～1990年の水位を基準とし、1991～1995年は+0.03m、1996～2004年は-0.12m、2005～2014年は-0.04m、2015～2020年は-0.23mを加える補正を行った。図に示した水位は補正後のものである。水位流量曲線は式(1)のとおりである。

$$Q_{hq} = 15.466 \times H_{obs}^2 \quad (1)$$

ここで、 Q_{hq} は水位から算定した流量（ m^3/s ）、 H_{obs}

は観測水位（m）である。

観測所設置当時の水位は一年を通じて水位計の計測範囲であったが、水位の低下により水位計の計測範囲より低くなる期間が生じている。そのため、年間の流量変化を把握するには降雨流出解析を行うことが望まれる。流量観測と水位、雨量データの状況を踏まえ、対象期間を1975年1月～2020年12月とする降雨流出解析を行うこととした。

降雨流出解析に用いる雨量は気象庁の府中のデータを用いた。図-4に1975～2020年の年間雨量を示す。最大は1998年の2030mm、最小は1984年の897mm、平均は1519mmである。

流域面積は参照する図面や算定方法によって値が異なる。例えば、1974年4月～1975年3月を対象とした解析³⁾では19.27km²、1988年10月1日～1990年12月を対象とした解析⁴⁾では16.94km²、2004年6月～2006年12月を対象とした解析⁵⁾では16.5km²を用いている。本解析においては対象期間を考慮し、文献4)で用いている流域面積16.94km²を採用した。

3. 多段タンクモデル

タンクモデルは計算が簡単であり、タンクの段数を増やすことにより、早い降雨流出から遅い降雨流出まで対応させることが可能である。しかし、タンクの段数が増えるとパラメーターの数が増加し、パラメーターの値を適切に設定することが難しくなる。

近年では、SCE-UA法⁶⁾等の大域的探索法によってパラメーター値を自動的に探索することが行われており、文献5)で用いた4段のタンクモデルでは18個のパラメーターを探索している。

小さい流量については水位からの把握が困難なため、1時間毎の計算とすることで断続的に把握できている流量によって計算の妥当性を判断できるようにした。1日毎の計算と比べて短時間の流出に対応するためにパラメーターの数が多くなるので、タンクモデルの構造に制約を設けることでパラメーター数の増加を抑えた。

図-5は本検討で用いたタンクモデルである。全てのタンクで流出孔1、損失孔1となっている。タンク各段において流出孔と損失孔は同じ大きさとなっ

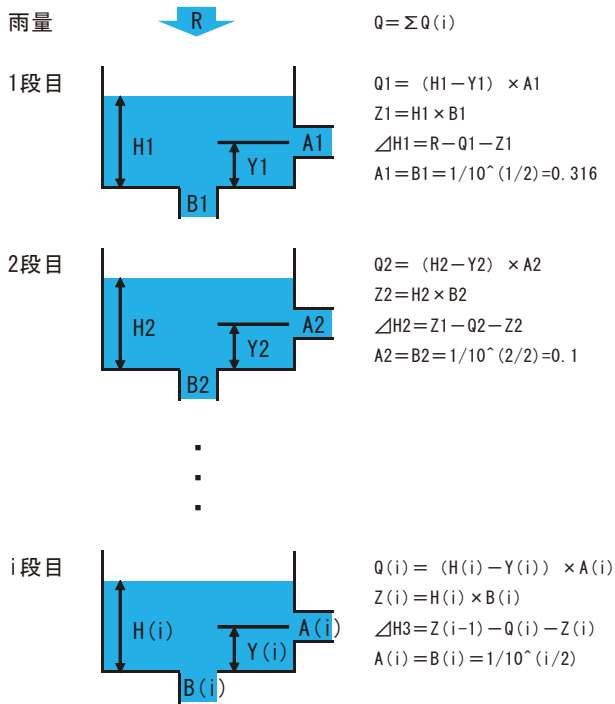


図-5 多段タンクモデル

ている。孔の大きさは1段が下がると上段の0.316倍になり2段下は2段上の0.1倍になる。各タンクで探索が必要となるパラメーターは流出孔の高さだけとなり、タンクの段数を増やしてもパラメーターの探索が容易になる。タンクの段数は異なる段数で計算した結果から8段とした。

本検討では降雨流出のみをタンクモデルで扱い、降雨流出以外の影響は一定量の流入出が継続するものとして取り扱い、この量はパラメーターとしてタンクモデルの流出孔高と同様に探索により求めた。

降雨流出以外の流入出を一定量として取り扱うため、解析に用いる水文データの期間は短いことが望まれる一方で、タンクモデルによって安定した結果を得るには4年以上のデータを用いる⁷⁾ことが望まれる。以上の点を踏まえて、パラメーターの値は5年間の水文データを用いて決定することとした。

4. パラメーター同定

探索を要するパラメーターはタンクモデルの各段の流出孔高と降雨流出以外の流入出量の計9個である。これらのパラメーターの探索はSCE-UA法によって行う。タンクモデルの各段の流出孔高は対数探索⁸⁾としており、探索範囲はタンクモデルの流出孔高が全段

共通で $10^{-2} \sim 10^3$ mm、降雨流出以外の流入出量は $-0.5 \sim 1$ m³/sとした。

観測流量と計算流量による評価 (*Err1*)、水位から算定した流量と計算流量による評価 (*Err2*)、観測流量と計算流量の流量有無による評価 (*Err3*)、24時間以内に降雨がない場合の水位上昇に対する評価 (*Err4*) を求め、これを合算した値 (*Err*) を誤差評価関数とし、この値の最小化を図った。

それぞれの評価式は式(2)～(12)のとおりである。

$$Err1 = \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{cal})^2}{\sum (Q_{obs} - Q_{obsave})^2} \quad (2)$$

$$Q_{obsave} = \frac{\sum Q_{obs}}{N_{obs}} \quad (3)$$

$$Err2 = \frac{\sum (Q_{hg} - Q_{cal})^2}{\sum (Q_{hg} - Q_{hgave})^2} \quad (4)$$

$$Q_{hgave} = \frac{\sum Q_{hg}}{N_{hg}} \quad (5)$$

$$Err3 = \frac{\sum (Q_{obs0} - Q_{cal0})^2}{N_{obs}} \quad (6)$$

$$Q_{obs0} = \begin{cases} 1 & (Q_{obs} > 0) \\ 0 & (Q_{obs} = 0) \end{cases} \quad (7)$$

$$Q_{cal0} = \begin{cases} 1 & (Q_{cal} > 0) \\ 0 & (Q_{cal} = 0) \end{cases} \quad (8)$$

$$Err4 = \frac{\sum (Q_{cal24} - R_{24})^2}{N_{cal}} \quad (9)$$

$$Q_{cal24} = \begin{cases} 1 & (Q_{cal(t)} < Q_{cal(t-24)}) \\ 0 & (Q_{cal(t)} \geq Q_{cal(t-24)}) \end{cases} \quad (10)$$

$$R_{24} = \begin{cases} 1 & (r_{24} > 0) \\ 0 & (r_{24} = 0) \end{cases} \quad (11)$$

$$Err = Err1 + Err2 + Err3 + Err4 \quad (12)$$

ここで、 Q_{obs} は観測流量 (m³/s)、 Q_{cal} は計算流量 (m³/s)、 N_{obs} は観測流量データ数、 N_{hg} は観測水位データ数、 $Q_{cal(t)}$ は時刻tにおける計算流量、 r_{24} は前24時間雨量である。

表-1に計算ケース一覧を示す。計算に用いる水文データを1年間ずつ移動させながら42ケースの計算を行うことで、経年的な特性変化を把握する。

図-6に計算で得られたタンクモデルの流出孔高を示す。縦軸の-2は 10^{-2} mm (0.01mm)、3は 10^3 mm (1000mm)を示す。流出孔高の値によっては、この流出孔

からの流出がなくなり、この場合、流出孔がないのと同等になる。計算ケースによってタンクモデルの流出孔高は異なっている。

図-7に降雨流出以外の流入出量を示す。降雨流出以外の流入出量の変化をみると、1977～1981年は大きく減少し、その後、2006～2009年頃まで緩やかな減少が続き、以降は増加傾向となっている。

図-8にケース10, 20, 30, 40の計算流量と観測流量の関係を示す。計算流量と観測流量の関係にはばらつきがみられるが、全体的な流量変化の傾向は表現できていると判断した。

表-1 計算ケース

	開始年	終了年	中間年		開始年	終了年	中間年
ケース1	1975	1979	1977	ケース22	1996	2000	1998
ケース2	1976	1980	1978	ケース23	1997	2001	1999
ケース3	1977	1981	1979	ケース24	1998	2002	2000
ケース4	1978	1982	1980	ケース25	1999	2003	2001
ケース5	1979	1983	1981	ケース26	2000	2004	2002
ケース6	1980	1984	1982	ケース27	2001	2005	2003
ケース7	1981	1985	1983	ケース28	2002	2006	2004
ケース8	1982	1986	1984	ケース29	2003	2007	2005
ケース9	1983	1987	1985	ケース30	2004	2008	2006
ケース10	1984	1988	1986	ケース31	2005	2009	2007
ケース11	1985	1989	1987	ケース32	2006	2010	2008
ケース12	1986	1990	1988	ケース33	2007	2011	2009
ケース13	1987	1991	1989	ケース34	2008	2012	2010
ケース14	1988	1992	1990	ケース35	2009	2013	2011
ケース15	1989	1993	1991	ケース36	2010	2014	2012
ケース16	1990	1994	1992	ケース37	2011	2015	2013
ケース17	1991	1995	1993	ケース38	2012	2016	2014
ケース18	1992	1996	1994	ケース39	2013	2017	2015
ケース19	1993	1997	1995	ケース40	2014	2018	2016
ケース20	1994	1998	1996	ケース41	2015	2019	2017
ケース21	1995	1999	1997	ケース42	2016	2020	2018

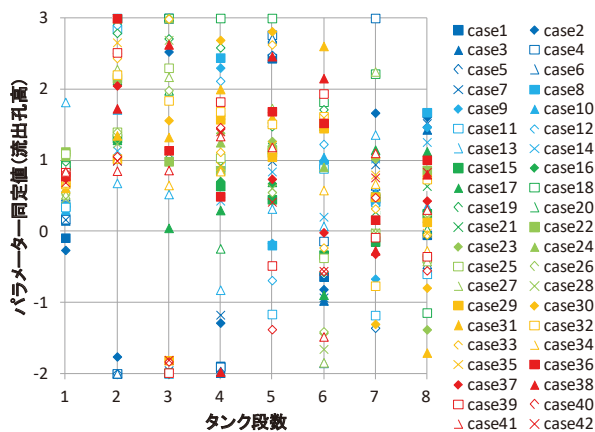


図-6 タンクモデルパラメーター

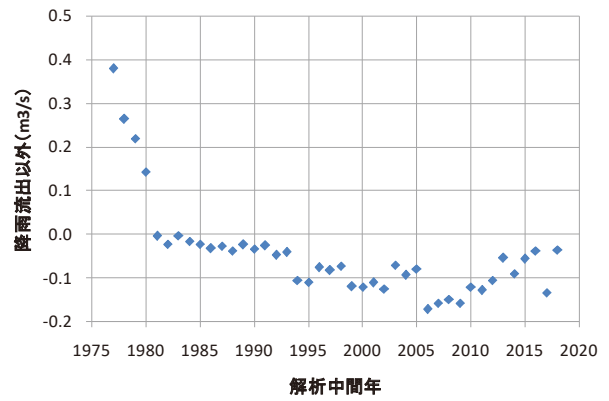


図-7 降雨流出以外の流入出量

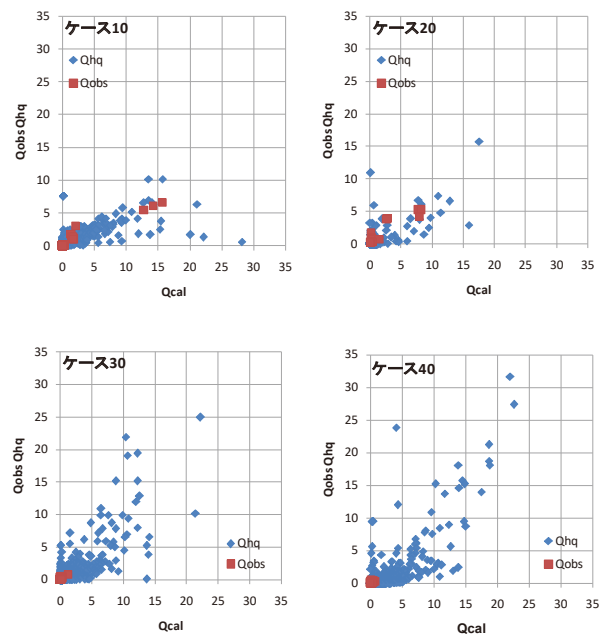


図-8 4ケースの計算流量と観測流量

5. 流況

計算流量を用いて豊水流量、平水流量、低水流量、渇水流量を算定する。1年間の流量データを大きい順に並べて、95番目の流量が豊水流量、185番目が平水流量、275番目が低水流量、355番目が渇水流量である。流量は各ケースの中間年のものを用い、中間年がない1975・1976年はケース1、2019・2020年はケース42の流量を用いた。

図-9に1975～2020年の流況を示す。図をみると1975～1981年の期間は豊水、平水、低水、渇水のいずれの流量でも減少傾向がみられ、1981年以降は傾向的に大きな変化はみられない。

1981年以降の豊水流量をみると1989年、1991年、1

998年が大きく、これらの年間雨量1770mm、1935mm、2030mmは年間雨量の平均1519mmと比べて大きな雨量となっている。

湧水流量についてみると、1975～1977年は約0.4m³/s、1978～1981年に流量が減少し1981年以降は0.1m³/s以下となっている。湧水流量が0となったのは、1999年、2000年、2002年、2004年、2006年、2008年、2010年、2017年、2019年の9年である。

図-10に解析期間中間年の湧水流量と降雨流出以外の流入出量を示した。1981年以降は降雨流出以外の流入出量はマイナスとなっており、降雨の状況によっては瀬切れが発生する可能性がある。1980年以前の湧水流量は降雨流出以外の流入出量と同様の変化をしている。また、小金井市の下水道整備⁹⁾が1981年には概ね整備を終えていることや国分寺市の下水道整備¹⁰⁾についても野川周辺では1981年には整備を終えている地域が多くあることから1980年以前の湧水流量の多くを生活雑排水が占めていると判断される。ケース1～42の計算によって得られた各パラメー

ターを用いたタンクモデルに1975～2020年の雨量を入力し同期間の流量を算定した。算定した時間流量から日流量を求め、日流量が0となった日数を瀬切れ日数とした。この瀬切れ日数は、雨量の条件を一致させた上での瀬切れ発生しやすいさを表している。

図-11に瀬切れ日数を示す。各ケースの計算結果のばらつきが大きいので、図には解析期間を含む5ケースの計算の平均を用いて算定した年あたりの日数を示した。図をみると1990年から2008年の間に瀬切れ日数が増加し、2008年以降は瀬切れ日数が減少している。また、図-10の降雨流出以外をみると解析開始時期から2008年頃まで降雨流出以外の流入出量が減少しており、その後は降雨流出以外の流入出量が増加している。このことから、小金井新橋では解析開始時期から2008年頃まで流量が減少傾向にあり、それ以降は流量が増加傾向にあると判断される。

流量増加の理由として、瀬切れ対策として河床部分に不浸透層の設置をすすめていることやJR武蔵野線トンネル湧出水の導水¹¹⁾、さらに、図-12に示した

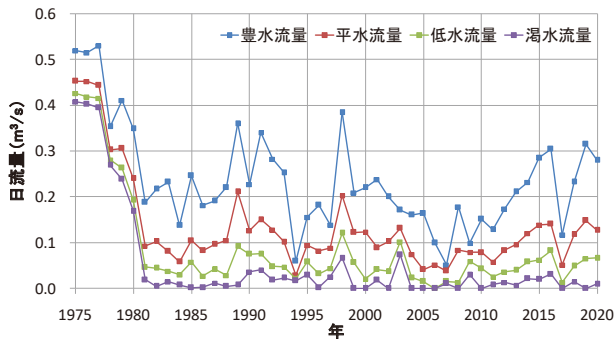


図-9 流況経年変化

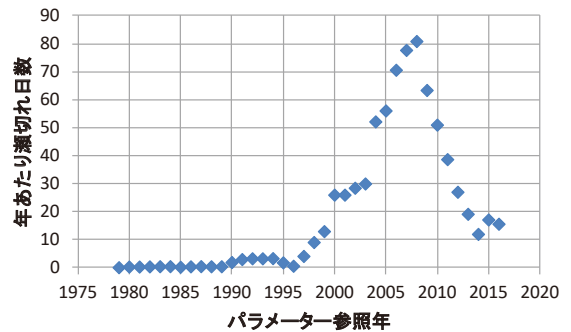


図-11 年あたり瀬切れ日数

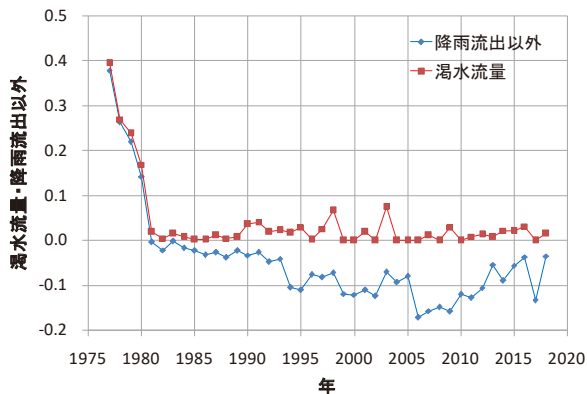


図-10 湧水流量と降雨流出以外の流入出量

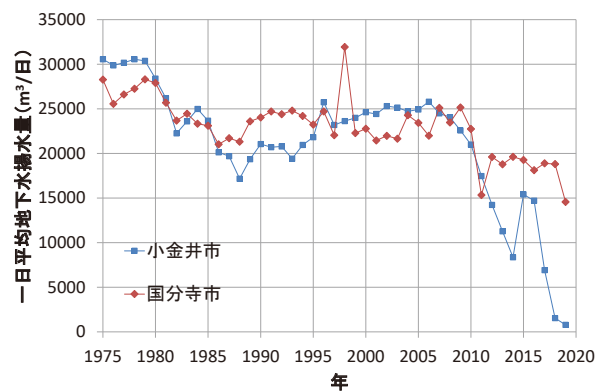


図-12 地下水揚水量

ように地下水揚水量¹²⁾の減少等が影響しているものと考えられる。

6. まとめ

野川上流域における観測水文データを用いて1975～2020年の長期流出特性を解析した。

解析に際しては1時間単位の降雨流出に対応する長

期流出モデルとして、タンク構造に制約を設けた多段タンクモデルを構築した。

解析の結果、1980年以前の流量は生活雑排水の影響が大きいことや2008年以降は流量が増加傾向にあるものと判断された。流量が増加した時期は瀬切れ対策の取り組み時期と整合しており、瀬切れ対策の取り組みが有用であると考えられた。

参 考 文 献

- 1) 野川流域連絡会 (2012) : なっとく流量の設定及び河川情報図の作成に向けて 第5期野川流域連絡会なっとく部会活動記録、<https://www.kensetsu.metro.tokyo.lg.jp/content/000047646.pdf>
- 2) 野川流域連絡会 (2014) : なっとく流量観測河川情報図の作成について 第6期野川流域連絡会なっとく部会活動記録、<https://www.kensetsu.metro.tokyo.lg.jp/content/000047637.pdf>
- 3) 和泉清、渡辺浩章、国分邦紀 (1974) : 都市河川流域の水収支に関する研究 (その1)、昭49. 都土木技研年報、51-61
- 4) 土屋十園、和泉清 (1991) : 野川の長期低水流出解析、平3. 都土木技研年報、153-162
- 5) 高崎忠勝、杉原大介、岩屋隆夫 (2007) : 野川流域の長期流出特性の解析、平19. 都土木技術センター年報、<https://www.kensetsu.metro.tokyo.lg.jp/content/000009896.pdf>
- 6) 田中丸治哉 (1995) : タンクモデル定数の大域的探索、農業土木学会論文集No. 178、103-112
- 7) 藤原洋一、田中丸治哉、畑武志、多田明夫 (2003) : 流出モデル定数の最適同定における誤差評価関数の選択に関する研究、農業土木学会論文集No. 225、137-149
- 8) 高崎忠勝、河村明、天口英雄、石原成幸 (2019) : USFモデルパラメータ同定におけるSCE-UA法の対数探索に関する検討、第46回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集、II-13.
- 9) 小金井市企画財政部企画政策課 (2017) : 小金井市公共施設等総合管理計画【概要版】、<https://www.city.koganei.lg.jp/shisei/seisakukeikaku/koukyosisetu/sougoukanrikeikaku/sakuteishimasita.files/gaiyouban.pdf>
- 10) 国分寺市 (2019) : 国分寺市公共下水道ストックマネジメント実施方針【概要版】、https://www.city.kokubunji.tokyo.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/020/300/kokubunji.gesui.pdf
- 11) 東京都 (2017) : 多摩川水系野川流域河川整備計画、<https://www.kensetsu.metro.tokyo.lg.jp/content/000028888.pdf>
- 12) 東京都環境局 (2021) : 令和元年都内の地下水揚水の実態 (地下水揚水量調査報告書)、pp. 30-37、https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/water/groundwater/pumping_regulations/outline.files/rl_yousui.pdf