27.玉川上水の水理学的現況と水路の深掘れ要因に関する研究

星野　成美[1*]・寺井　しおり[2]・小山　直紀[3]・
辻野　五郎丸[2]・細見　寛[2]・山田　正[2]

[1]中央大学大学院理工学研究科（〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27）

[2]中央大学研究開発機構（〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27）

[3]中央大学理工学部都市環境学科（〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27）

＊ E-mail: *a16.wx6g@g.chuo-u.ac.jp*

江戸時代に江戸市中への給水を目的として造られた玉川上水は，現在水路の深掘れが生じており，安全性や水路としての機能の低下といった問題が生じている．本研究は，水理学的な深掘れの要因を考察することを目的に，玉川上水の水路断面形状，標高，地質について縦断的な特徴を整理した．この結果，深掘れが生じている中流部は，水路勾配が大きくなっており，水路床の洗堀が生じやすい場所であることが明らかになった．また，玉川上水の上流部は表層が礫層であるのに対し，中下流部は深掘れが生じやすい関東ローム層となっていることがわかった．

Key Words :*Tamagawa Josui, slope failure , precious historical heritage, SfM*

1. はじめに

玉川上水とは，江戸時代，江戸に飲み水を供給することを目的として造られた人工水路で，羽村取水堰にて多摩川から取水し，四谷大木戸（現在の東京都新宿区）まで全長約43 km，標高差約100 mを自然勾配で流していた．利用最盛期には本線から32～34本の分水が引かれ，経済・工業・農業・交通等の多岐に亘って活用することで江戸を支えたが，その後の都市の発展や上水道の発達により，現在，水道水源としての利用は小平監視所までの約12 kmにとどめられている．1980年代の清流復活事業により小平監視所から高度下水処理水を放流しているが，浅間橋地点で神田川に放流されるため，それより下流では水が流れていない状況は変わっていない（**図-1**）．

2003年8月，江戸・東京の発展を支えた歴史的価値を有する土木施設・遺構として，文化財保護法に基づき，羽村から渋谷区に至る開渠部分約30 kmが国の史跡に指定された．また，2021年3月，東京都は新たな都政の羅針盤として「『未来の東京』戦略」という総合計画を策定し[1)]，この中で，玉川上水の通水実現に向けてのビジョンを明記した．玉川上水からの通水は，東京に豊かな水と緑の空間をもたらすだけでなく，下流の江戸城外濠に導水されることで，夏場にアオコが大量発生している江戸城外濠を始めとする東京の水環境の改善や，災害時の緊急防災水利の確保という様々な効果が期待される．

その一方で，近年は特に高度下水処理水流下区間である中流部の法面の崩落が進み，文化財としての価値の低下が大きな問題となっている．**図-2**は，著者が東京都立川市の上水小橋で撮影した玉川上水の右岸側の写真であるが，根系が露出するほど水路の法面の土が崩落し，

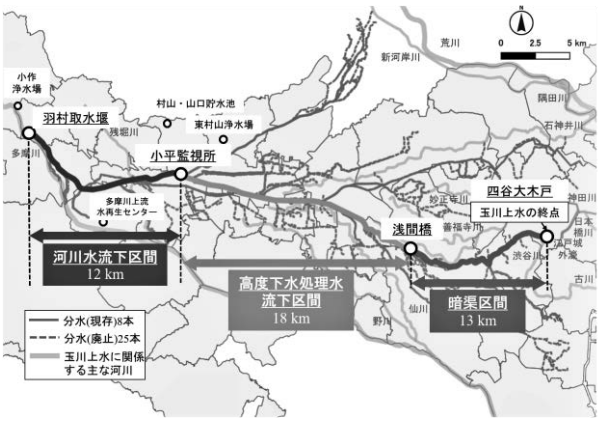

図-1 玉川上水の現況

垂直に切り立った法面が形成されている．日本河川開発調査会[2]は，現在の玉川上水は水路が極端に縦侵食が生じたように深掘れして，関東ローム層下部の粘土層あたりで，許容流速と平衡が保たれていると考えられると述べている．一般的に，等流状態では重力の流れ方向成分とのつり合うようにせん断力が働き，これに応じて，砂礫粒子を下流へ押し流そうとする力（掃流力）が生じるが，この掃流力が大きくなると，水路床の洗掘により深掘れした水路が形成される．この水流の作用の他に深掘れ水路が形成された要因としては，小泉ら[3]が，法面の霜柱の形成がきっかけとなって，土の垂直的な剥離が生じていると述べている．今後，玉川上水の通水に向けて，このような深掘れした水路に流量を増やすと，水流によってさらなる深掘れや法面が削り取られるといった安全性の問題や，流出した土砂がある地点で堆積するといった水路としての機能の問題が生じる可能性がある．そこで，本研究は，玉川上水の縦断的な特徴を整理することで，深掘れの要因を考察することを目的とする．

2. 研究方法

本研究では，玉川上水の4地点の水路断面形状の写真測量と，標高の縦断分布，地質データの縦断分布に着目した．まず，水路断面形状の現地調査であるが，一般的な測量は作業時間がかかると共に，水路内での作業実施に伴う許認可手続きが必要となり，管理する自治体が複雑に入り組んでいる当該水路では事務作業が煩雑になる．そこで，多数のステレオペア画像から対象物の3次元形状データを得ることのできるSfM多視点ステレオ写真測量(Structure-from-Motion Multi-View Stereo Photogrammetry)を用いて，玉川上水の水路断面の形状把握を行った．**図-3**の灰色の丸で示す撮影地点から下流方向を向き，あらかじめ以下の通り設定したデジタルカメラを用いて写真撮影を行った（絞り値：F2.0，焦点距離：45mm，ISO感度：200，画像サイズ：1280×960）．また，画像処理には非営利・学術目的において無料で使用できるVisualSfM[4, 5]，3次元点群データの可視化には同じくフリーソフトであるCloud Comapre[6]を用いた． 縦断的な標高値は，国土地理院の基盤地図情報数値標高モデル（5m DEM），地質柱状図は，東京都建設局が公開している東京の地盤（GIS版）[7]において，玉川上水から100 m以内の距離にある地質柱状図のデータを用いた．用いたデータの位置は，**図-3**の白丸で示す．

図-2 玉川上水の深掘れの様子

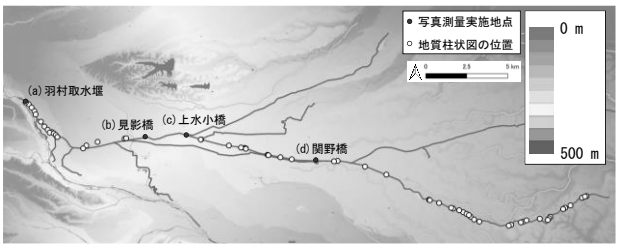

図-3 調査地点および地質柱状図の位置

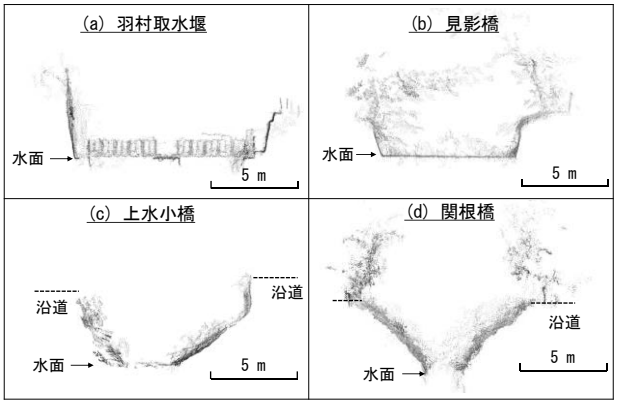

図-4 写真測量による水路断面形状

3. 結果

(1) 水路断面形状

図-4は，各地点において写真測量を行った結果の図である．どの地点においてもおおよそ30 枚の写真から，水路断面形状が把握できた．ただし，写真測量では水面下の測量は不可能であり，図中の矢印の先は水面を表している．以下，羽村取水堰，羽村取水堰から9.8 kmの見影橋，12.5 kmの上水小橋，21.7 kmの関野橋をそれぞれa, b, c, d 地点とする．a, b 地点は護岸が施されており，切り立つ法面がはっきりと見られる．各地点の沿道と水面の高低差に着目すると，a地点の右岸側には多摩川が流れており，左岸側は多摩川の氾濫を防ぐために沿道が高くなっていることがわかる．また，b地点の沿道と水面の高低差は約1.5 mとなっているのに対し，c, d地点は，水面が沿道より約3~5 mほど低くなっており，その中でも特に，c 地点の右岸側が高くなっている様子がわかる．

また，水路幅に着目すると，a 地点が約10 m，b 地点が約8 mであるのに対し，c，d 地点は約3 mと狭くなっている．

⑵ 標高

図-5は，玉川上水本線の標高の縦断図である．以下，羽村取水堰から小平監視所（0 km～12 km）を上流部，小平監視所から浅間橋（12 km～30 km）を中流部，浅間橋から四谷大木戸（30 km～43km）を下流部とする．**図-5**より，中流部は上・下流部と比べて凹凸が少なくなだらかになっていることがわかる．例えば上流部のすずかけ橋で標高が低くなっているが，これは残堀川と玉川上水の交差点であり，残堀川の下を玉川上水が潜っている地点である．中流部の中でも特に小平監視所から三鷹駅までにおいては，このような起伏は見られないことが特徴として挙げられる．また，中流部の水路勾配が上・下流部に比べて急になっているように見える．そこで，1 kmごとに水路勾配をとったものを**図-6**に示す．玉川上水の平均水路勾配が1/430であるのに対し，上・中流部は，1/200 ~1/1000で流れていることがわかる．また，水路勾配は小平監視所付近を頂点として山を形成している．すなわち，羽村取水堰から小平監視所あたりにかけて徐々に水路勾配が大きくなり，浅間橋にかけて勾配が小さくなっていくことがわかる．

⑶ 地質柱状図

図-7，8は，東京都建設局が公開している地質柱状図のうち，玉川上水からの距離が100 m以内の位置にあるデータを選び，孔口標高をもとに羽村取水堰からの距離

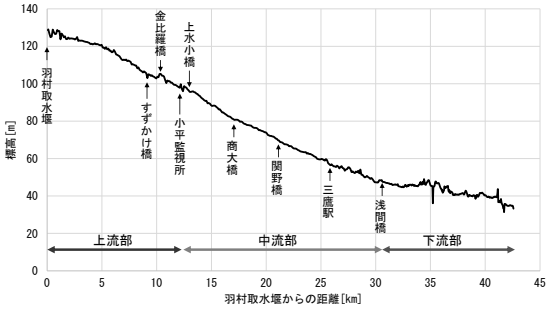

図-5 玉川上水本線の標高の縦断図

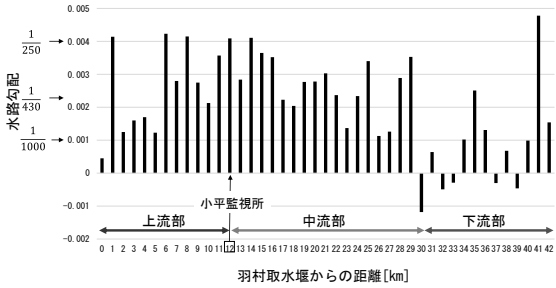

図-6 玉川上水本線の水路勾配の縦断図

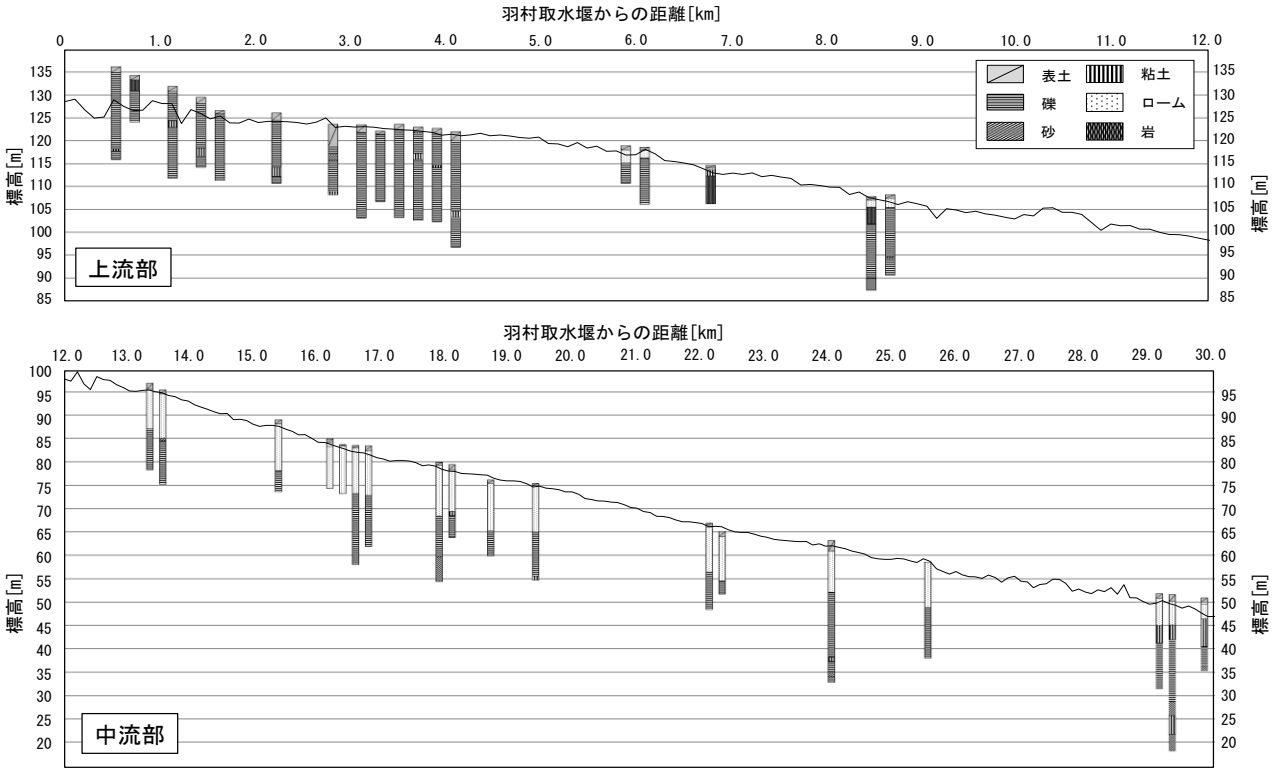

図-7 玉川上水沿いの地質柱状図（上・中流部）

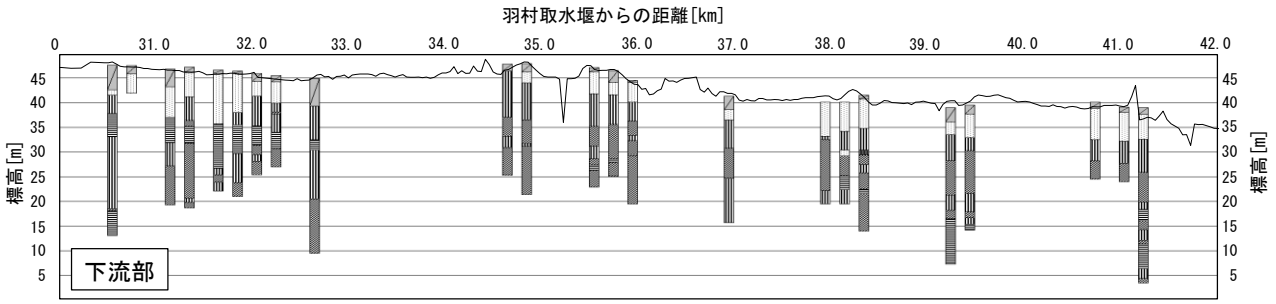

図-8 玉川上水沿いの地質柱状図（下流部）

ごとに並べ，さらに(2)の標高データを重ねたものである．上流部は，主に表層は礫が占めており，羽村取水堰から約6 km地点から，表層が層厚2 m程度のローム層となっている．中流部は，層厚10 m程度のローム層の下に礫層が占めている．さらに，29 kmよりも下流は，層厚5 m程度のローム層の下が粘土層や砂層が交互に続いている．上・中・下流部で地質に違いが見られ，特に中流部は，上・下流部に比べてローム層が厚いことが特徴として挙げられる．また，玉川上水の標高とその周辺の地質柱状図を比較すると，多くの地点で表土の下を流れており，玉川上水の水路床は，上流部は礫層，中・下流部はローム層となっていることがわかる．

4. 考察

現在，玉川上水の上流部は水道原水導水路として使用されており，水道施設として管理が行われていることから，全域にわたって水路は護岸がなされている．また，羽村取水堰から多摩川の水が約2 m^3/s, 小平監視所から高度下水処理水が約0.3 m^3/s 流れている．図-4の水路幅や水面と沿道の高低差の違いは，護岸の有無や流量の違いが要因となっていると考えられる．また，図-5から最も水路勾配が大きくなるのは中流部であるが，水路勾配が大きいと重力の流れ方向成分とのつり合うようにせん断力も大きく，前述したとおり，これに応じて掃流砂量も大きいために水路床の洗掘が生じやすいと考えられる．さらに地質について，標準貫入試験の結果では，礫層のN値は50，ローム層は2～8となっており，ローム層は礫層と比べて低く，法面の崩壊や水路床の洗堀が起こりやすいと考えられる．中下流部の地質はローム層が占めており，今後玉川上水の通水が実現したり，流量が増えたりした場合には，中下流部のローム層において更なる深掘れが進行する可能性があると示唆される．

4. まとめ

本研究は，安全性や水路としての機能の低下といった問題が生じさせている玉川上水の深掘れの要因を考察することを目的に，玉川上水の水路断面形状，標高，地質について縦断的な特徴を整理した．①沿道と水面の高低差が大きく，また水路幅が狭くなっていること，②水路勾配が大きく水路床の洗堀が生じやすいこと，③表層は深掘れが生じやすいローム層が覆っていることが挙げられることがわかった．本研究で着目した標高と地質の他にも，流量や分水の変遷や植生，舟運や新田開発などの利用形態も深掘れの要因として考えられるため，これらの要因についても時間的，縦断的に整理を進めていく所存である．

参考文献

1) 東京都，「未来の東京」戦略，2021.
2) 日本河川開発調査会：多摩川の水利開発史と水利調整に関する研究，(財)とうきゅう環境浄化財団研究助成，No. 52，1984
3) 小泉武栄，伊東敦子：玉川上水における法面の非対称とその成因，地形　第 32 巻第 1 号，pp. 1-14，2011.
4) Changchang Wu：VisualSFM: A Visual Structure from Motion System，http://ccwu.me/vsfm/，2011.
5) Changchang Wu，Sameer Agarwal，Brian Curless，and Steven M. Seitz：Multicore Bundle Adjustment，CVPR 2011.
6) Cloud Comapre，http://www.danielgm.net/cc/
7) 東京都建設局，東京の地盤（GIS 版），http://www.kensetsu.metro.tokyo.jp/jigyo/tech/start/03-jyouhou/geo-web/00-index.html