

近世辰巳用水の布設状況に関する 土木工学的研究

池本敏和¹・北浦 勝²・玉井信行³・山本光利⁴・安達 實⁵

¹正会員 金沢大学講師 理工研究域環境デザイン学系（〒920-1192 金沢市角間町）

E-mail: tikemoto@se.kanazawa-u.ac.jp

²正会員 金沢職人大学校理事長・学校長（金沢大学名誉教授）（〒920-0046 金沢市大和町1-1）

E-mail: kitaura@k-syokudai.jp

³名誉会員 東京大学名誉教授（〒240-0112 三浦郡葉山町堀内366）

E-mail: n.tamai@mba.ocn.ne.jp

⁴正会員 応用地質株式会社（〒920-0365 金沢市神野町東108）

E-mail: yamamoto-mitsuto@oyonet.oyo.co.jp

⁵正会員 金沢工業大学客員研究員（〒921-8501 石川県野々市市扇が丘7-1）

E-mail: adachi.makoto@ruby.plala.or.jp

辰巳用水は1632（寛永9）年に建設され、当時我が国で最大規模であった逆サイフォン管路を有していた。それにも関わらず、現在使用されていないことから、本研究では逆サイフォン部分の復元の可能性を検討するために管路の平面および断面状況の変遷について調査した。また絵図などから、当時の管路の経路状況を把握するとともに、現在の都市計画図にプロットすることで、年代別の経路状況が明らかとなった。さらに各経路に対する逆サイフォン部の出水地点での流量を計算した結果、管路が木管であった時期では、経路状況の変化に伴い流量が徐々に低下し、1843年以降の石管への布設替えによって、流量が上昇していた可能性があることがわかった。

Key Words : Tatsumi-waterway, Reverse siphon, pipe line, transitions, flow rate

1. はじめに

辰巳用水は1632（寛永9）年に築造された。犀川上流・上辰巳村に水源を発し、約4kmの素掘隧道、小立野台地から開水路を経て、現在の兼六園から金沢城への埋設管路（逆サイフォン部）となり、城内・三の丸（現在の五十間長屋前の堀のレベル）に水を供給していた。1634（寛永11）年には管路が延伸され、金沢城二の丸まで水を上げた。当時、我が国では最大規模の逆サイフォン管路であった。しかし逆サイフォンとなっている管路部分は、世の中が平穏になったことで、従来の辰巳用水建設目的である防火水・生活水・防衛の強化の必要がなくなり、使用されなくなった¹⁾。現在は曲水（開水路）となって兼六園・霞ヶ池まで水を供給している。辰巳用水は現在もその大部分が使われており、国史跡に指定されている貴重な日本土木遺産である。

近年史跡や重要文化財に指定される伝統建造物の保存、修復、復元や活用が盛んに行われている。歴史都市金沢には他の都市に類を見ない55本という数多くの用水が流れており、金沢の今後のまちづくりの骨格に用水を生かさない手はないと考える。金沢の歴史と伝統を重んじつつ、後世に継承される用水整備計

画が必要である。以上の二点を踏まえ、辰巳用水下流の逆サイフォン部の復元の可能性を検討することを本研究の目的とする。

具体的には、逆サイフォン管路部の主要箇所に関して文献調査を行い、全体の布設状況に関して絵図とその作成年代を参考に時代に沿った変遷を捉える。こうして明らかとなった布設状況を現在の都市計画図²⁾にプロットするとともに、踏地調査を通じ、逆サイフォン管路部の復元の可能性を検討する。また当時の状況をより正確に再現し、観光客にも一目でわかるように年代別の布設状況に対して当時の流量算定を試みる。

2. 逆サイフォン管路部における変遷の解明

(1) 縦断面から見た管路部の変遷

過去の文献から、辰巳用水の逆サイフォン管路部の主要箇所の管路位置や管種の把握を行い、簡略縦断面における年代別の布設状況を考察する。

初めに1632（寛永9）年に辰巳用水が建設され、1634（寛永11、2年間）年まで、すなわち、三の丸まで導水されたときの逆サイフォン管路に注目して、布設状況を考察する。辰巳用水建設当初

の管路部の簡略縦断面を図-1に示す。図中の灰色の部分で逆サイフォン部の導水路を表す。寛文7年図³⁾の水路の終点と延宝金沢図⁴⁾の奥村屋敷北の方とは一致しており、辰巳用水完成当時の状況が描かれている「巽御殿出来当時の兼六園之図」の管路は二条石管路（遺構）と同様⁵⁾、現・兼六園霞ヶ池北の方と一致している。したがって、この地点が辰巳用水建設初期における三の丸の堀に辰巳用水を導水したときの管路部の始点であると考えられる⁶⁾。

三の丸導水時の取水口である奥村屋敷北の方の標高が48.0mであるのに対し、1634(寛永11)年に二の丸まで導水しようとしたときの二の丸の標高が50.2mであった。これでは管路部終点の標高(50.2m)の方が高くなってしまいうので、逆サイフォン管路の始点を二の丸の標高(50.2m)⁷⁾よりも高い位置まで延伸しなければならなかった。そこで図-2の石引水門（逆サイフォン管路取水口）まで管路を延伸した。幾度かの発掘調査⁸⁾により、延伸された埋設木管路が出土しているのが証拠である。

その後、現・兼六園上坂口周辺に始点に移される（図-3参照）⁹⁾。これまでの経路はすべて木管であったが、石工技術の進歩により、1843(天保14)年に木管が石管に取り替えられた¹⁰⁾。管路部の簡略縦断面を図-4に示す¹¹⁾。現在も見られるように、霞ヶ池北の方に逆サイフォン部の始点に移された。1634(寛永11)年以降、管路の終点はすべて二の丸である。

以上を踏まえ、辰巳用水の逆サイフォン管路部の経路縦断面を時代の古い順に並べると、図-1から図-4のように変遷したことがわかる。それぞれ図の灰色に塗りつぶした右端部分が逆サイフォン管路の取水口、同じく灰色に塗りつぶした左端部分が最終導水地点となっている。

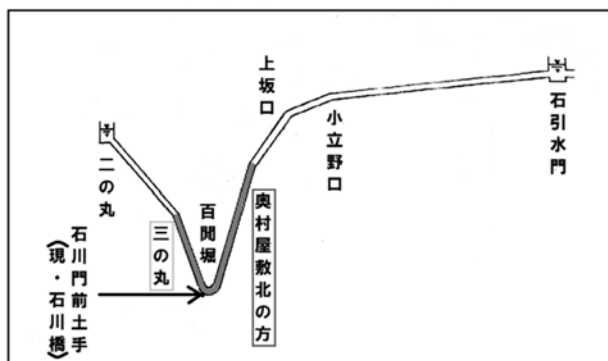


図-1 辰巳用水建設当初の管路部の簡略縦断面¹¹⁾

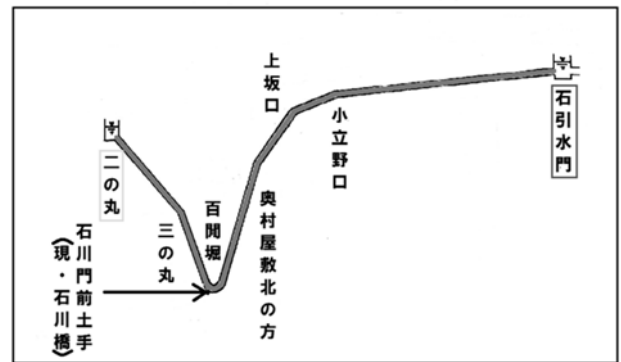


図-2 1634年以降の管路部の簡略縦断面¹¹⁾

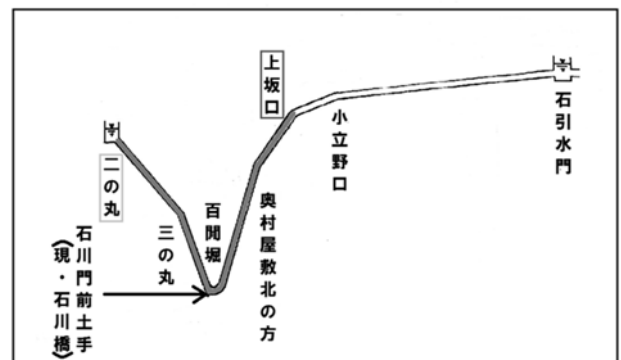


図-3 木管時代の最終経路の管路部の簡略縦断面¹¹⁾

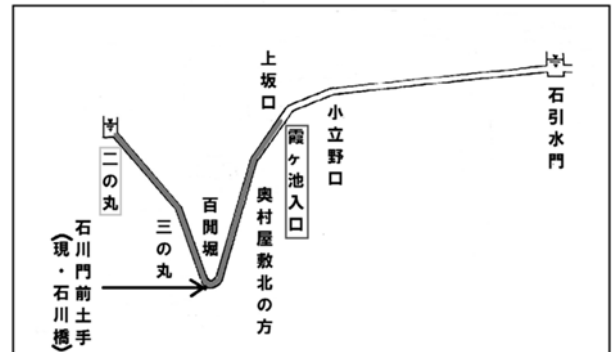


図-4 1843年以降の石管による管路部の簡略縦断面¹¹⁾

(2) 平面から考察した管路部の変遷

2. (1) で明らかにした管路部縦断面図の布設状況と同様に、管路部平面図における布設状況を、絵図を参考に考察する。すなわち、辰巳用水が完成した1632(寛永9)年以降に描かれた管経路が記載されている絵図から辰巳用水の逆サイフォン部の管路状況を明らかにする。このとき、溜弁、枅などが描かれているかなどに注意を払い、発掘調査の結果¹²⁾、¹³⁾と照査しながら、時代別の管路変遷の解明を行う。

今回使用した主要な絵図を作成年代別の順に表すと、以下のようである。

- ・延宝金沢図⁴⁾ (1675年)
- ・金沢城図¹⁴⁾ (1720～1740年)
- ・学校御絵図¹⁵⁾ (1800年)
- ・竹沢御殿御引移前総図絵図¹⁶⁾ (1822年)
- ・御城中壺分基絵図¹⁷⁾ (1832年)
- ・御城分間御絵図¹⁸⁾ (1850年)

延宝金沢図⁴⁾、学校御絵図¹⁵⁾、竹沢御殿御引移前総図絵図¹⁶⁾は、逆サイフォン管路部における取水口及び兼六園から石川橋手前までの管経路が、金沢城図¹⁴⁾、御城中壺分基絵図¹⁷⁾、御城分間御絵図¹⁸⁾は石川橋から金沢城二の丸までの管経路が主として描かれている。延宝金沢図⁴⁾・金沢城図¹⁴⁾、学校御絵図¹⁵⁾・御城中壺分基絵図¹⁷⁾、竹沢御殿御引移前総図絵図¹⁶⁾・御城中壺分基絵図¹⁷⁾、御城分間御絵図¹⁸⁾(霞ヶ池を取水口とした石管の経路)から二の丸導水時の経路を考えると、逆サイフォン管路部の年代別の管路変遷を表すことができる。

現代における逆サイフォン管路の復元の可能性を考えるため、都市計画図²⁾に絵図から読み取った布設状況をプロットする。

初めに図-1に示した経路には、当時の金沢城周辺の辰巳用水を描く絵図は存在しない。そこで、金沢城内の辰巳用水管経路を正確に描く最古の絵図である金沢城図を基に経路を検討した。管路は、奥村屋敷北の方から石川門を通り、城内に入る。その後、金沢城図と同じ経路で三の丸まで導水された。当時の経路を都市計画図²⁾にプロットすると図-5のようになる。太線が辰巳用水経路である。辰巳用水の建設初期には、管路は石川門を迂回せず、地下を通っていた。しかし腐食した埋設木管の取り扱いが困難なため、管路を迂回させた¹⁹⁾ものと考えられる。

次に図-2の経路について、延宝金沢図⁴⁾・金沢城図¹⁴⁾を用いて考察する。上流部は石引水門に、下流部は二の丸まで管路が延伸された。用水の経路を都市計画図にプロットすると図-6のようになる。

図-3の経路について、学校御絵図¹⁵⁾・御城中壺分基絵図¹⁷⁾を用いて考察する。逆サイフォン管路部の布設状況を図-7に示す。絵図の作成時期から1800年頃に用水として使われていた経路と推察される。学校御絵図¹⁵⁾から新たな溜弁が発見された。また霞ヶ池南東付近の発掘調査²⁰⁾から、図-7に示す新たな取水口が学校御絵図¹⁵⁾の経路上に確認された。図-6と図-7の経路を比較すると、図-6の管路長が長いために木管の維持管理が困難であったと考えられる。そのため新しい経路の取水口は兼六園内中央に移され、木管の水密性を向上させたものと考えられる。同時に、金沢城内における管路長を短くし、水頭損失を減少させるために経路を全体的に北側に移動している。

同様に竹沢御殿御引移前総図絵図¹⁶⁾、御城中壺分基絵図¹⁷⁾を用いて、図-3の縦断面経路の経路について検討する(図-8参照)。図-8の経路は年代的には絵図の作成時期から1822(文政5)年頃まで使われていた。図-7と図-8を比較すると、管路の経路が兼六園内では、北側に移設された。これは、同年に完成した竹沢御殿の影響であると考えられる。すなわち竹沢御殿の地下部に

管路が存在すると、管路の修繕が難しくなることから、竹沢御殿の脇を通したものと考えられる。

1843(天保14)年には管路の材質が木管から石管に取り替えられた¹⁰⁾。図-4の経路について考察する。1843(天保14)年以降の石管経路は霞ヶ池の入口を取水口としており²¹⁾、現在も一部が残存している。御城分間御絵図¹⁸⁾から、その時期以降の石管経路は図-9のようになる。しかしながら時代の変遷に伴い、19世紀後半には防火・防衛の必要が無くなったため、逆サイフォン管路は使われなくなった¹⁾。

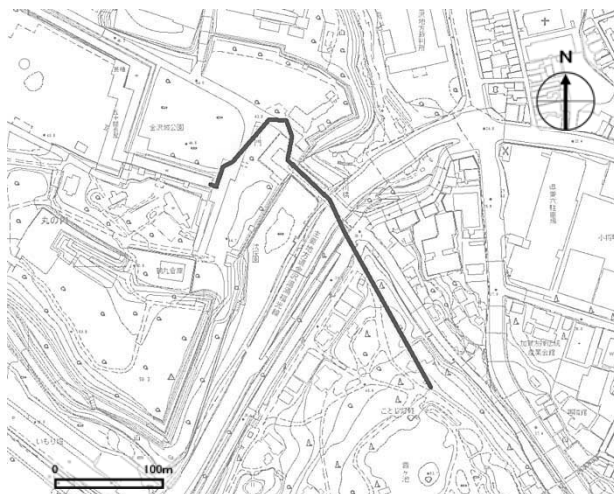


図-5 三の丸導水時における管路部の布設状況

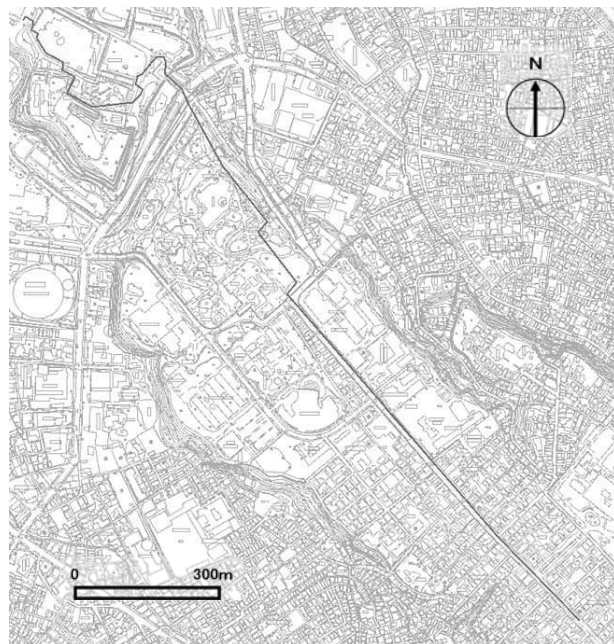


図-6 1634(寛永11)年以降の管路部の布設状況

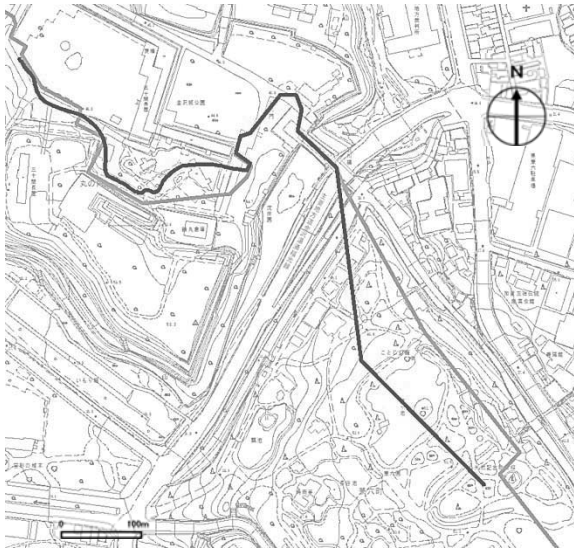


図-7 1800（寛政12）年頃に用いられた管路部の布設状況

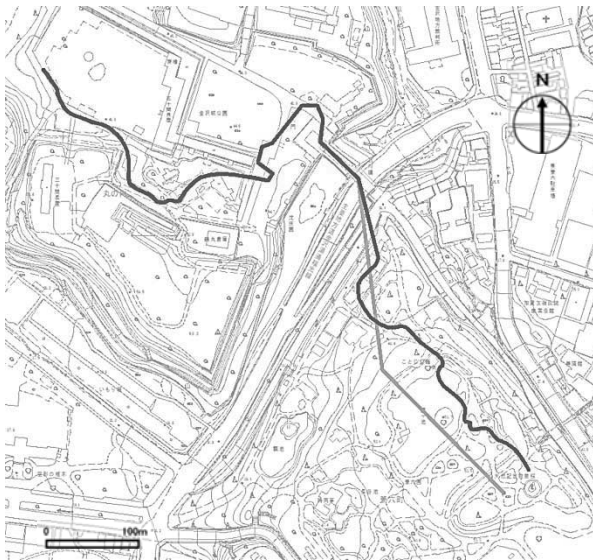


図-8 1822（文政5）年に用いられた管路部の布設状況

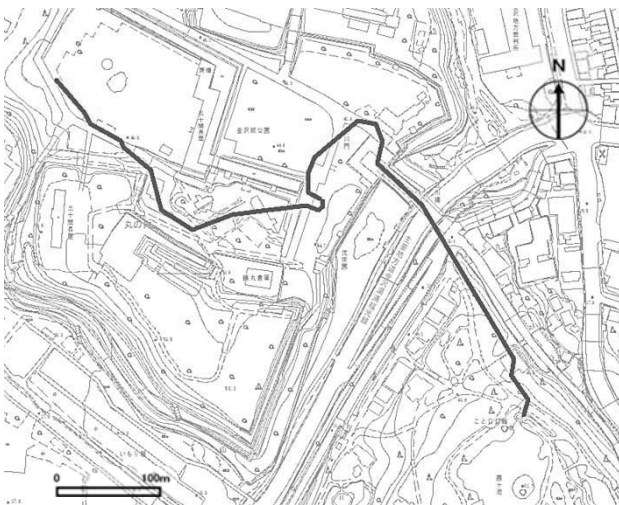


図-9 1843（天保14）年以降の管路部の布設状況

3. 経路における最終地点への導水量算出

本章では、2. で明らかにした管路の布設状況や管種を考慮し、それぞれの最終地点への導水量を計算する。なお図-8の経路は図-7の経路については水理条件のパラメータがほぼ同値となるため、同一経路とみなした。

算出方法については、それぞれの経路における主要地点を選定する。ここでは文献から得た経路に示されている石引水門、現在の兼六園小立野口、上坂口、奥村屋敷北の方、石川門土手、三の丸、二の丸、霞ヶ池のそれぞれの経路が通る地点（位置）の距離(x座標, 単位: m)、標高(y座標, m)、区間距離(m)、x軸との交角(rad)、屈折角度(°)を表作成する。木管と石管の主要箇所各パラメータをそれぞれ表-1、表-2に示す。距離、標高を決めるに当たっては、奥村屋敷北の方から下流の部分は文献を参考に²²⁾、それより上流に関しては、現代の標高図²³⁾から読み取った。

次に、式(1)の相当粗度と式(2)のレイノルズ数、そして式(3)の損失水頭差とムーディ図をもとに、繰り返し計算法を用いて流量の算定を行う²⁴⁾。

$$\frac{k_s}{d} = n \quad (1)$$

$$Re = \frac{\rho v D_H}{\mu} \quad (2)$$

$$H = \left\{ f_o + f_e + f_{be} + f \left(\frac{l}{d} \right) \right\} \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

ここで、 k_s :等価粗度、 n :相当粗度、 ρ :流体(水)密度(15℃の時)、 Re :レイノルズ数、 μ :流体の粘性係数、 v :管内の平均流速(m/s)、 D_H :水力直径(m)、 g :重力加速度(9.8m/s²)、 d :管径(cm)、 f :ダルシー・ワイズバッハの摩擦抵抗係数、 f_e :入口の損失係数、 f_{be} :管の屈折による損失係数、 f_o :出口の損失係数、 l :管の全長である。なお本研究では、 $f_e=0.5$ 、 $f_o=1.1$ である²⁵⁾。水の密度に関しては平均水温15℃のときの値を仮定した。また屈折角と損失係数の関係から、屈折角度が15°以下の時は、屈折による損失係数と屈折角度は線形関係であると仮定した。

なお、木管の腐食の進行や、重量不足による屈折部における継手木からの抜け出しなどの材質・構造上の問題は考慮していない。その根拠としては、それぞれの絵図における導水地点近傍の堀には、水で満たされている状況が描かれていたため、管路の構造は問題なく導水できていたと判断できるからである。

奥村屋敷北の方から三の丸までの経路(図-5)における流量を算定する。図-5の奥村屋敷北の方を起点とした主要箇所データの表-1に示す。このときの管径は8cm×8cmの正方形断面、(奥村屋敷から石川門土手まで)190.5m、石川門土手から三の丸までは150.4mである。また一辺 b の正方形断面では、動水半径 R は $R=b/4$ であり、直径 d の円管での動水半径は $R=d/4$ である。したがって動水半径は円管直径と正方形の辺長とは等価な関係にある。木管の代表的等価粗度の数値は、0.018~0.092(cm)とあり²⁵⁾、

一番大きな値を用いると、相当粗度は3桁までを考えると0.012となる。

そこで平均流速値を求めると0.63m/sとなる。水温15℃としてレイノルズ数を計算すると、 $Re=5.9 \times 10^4$ となる。レイノルズ数と相当粗度値に対する摩擦抵抗係数から、ムーディ図の推定値は0.040となる。この推定値により、平均流速 $v=0.62\text{m/s}$ が算出される。得られた新しい平均流速に対するレイノルズ数を計算すると $Re=5.8 \times 10^4$ である。ムーディ図によれば、新しいレイノルズ数と相当粗度に対する摩擦抵抗係数の値は0.040と考えてよいことからの、これ以上の繰り返し計算が必要ないことを意味している。よってこの経路における流量は、 $Q = Av = 4.0 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s} = 4.0 \text{ l/s}$ となる。

同様に各経路における流量の算定結果を表-3にまとめた。図-7及び図-8の経路に関しては、金沢城鶴の丸付近の発掘調査の結果²⁹⁾から、内・直径8cmの円形木管に断面変更されたと考えた。

以上のように建設初期の時期から様々な経路などによって、

主要個所の諸元を考慮しながら流量の算出を行った。時期を経るごとに流量が上がったのではなかった。表-3に示すように時期別の布設状況および管種に応じた最終到達地点への流量（送水量）を算出できたことは興味深い。

このように二の丸に放流された辰巳用水の水量では、藩士全員に与えられるほどの水量ではなかった。したがって、主に藩主一族の生活水、泉水に用いられ、飲料水は城内の井戸によって供給されたものと考えられる。また、余水は堀に溜められ、火災用の防火用水として利用されたものと考えられる。

1632（寛永9）年より1843（天保14）年までの送水量は減少傾向にあった。しかしそれ以降から幕末まで、三の丸への送水量が約9倍になったことは画期的なことであり、逆サイフォン部への石管利用は有効であったと考えられる。

城内には無数の井戸が存在していたことから、辰巳用水、井戸水などの用途別の分担割合に関する文書発掘が必要であると考えている。

表-1 逆サイフォン管路の主要箇所データ（木管）

主要箇所	標高(y座標,m)	区間距離(m)	x軸との交角(ラジアン)	屈折角度(度)	屈折損失係数
石引水門	57.8				
現・兼六園小立野口	53.5	1020	-0.00422	0.1	0.0001
上坂口	52.7	150	-0.00533	1.0	0.0015
奥村屋敷北の方	48	200	-0.02350	1.7	0.0025
石川門前土手	38	190	-0.05258	5.5	0.0081
三の丸	44.6	150	0.04397	1.5	0.0021
二の丸	50.2	300	0.01866		

表-2 逆サイフォン管路の主要箇所データ（石管）

主要箇所	標高(y座標,m)	区間距離(m)	x軸との交角(ラジアン)	屈折角度(度)	屈折損失係数
兼六園霞ヶ池	53.6				
石川門前土手	42.2	190	-0.05993	5.0	0.0073
三の丸	46.2	150	0.02666	0.8	0.0011
二の丸	50.2	300	0.01333		

表-3 各経路の流量と各種データ

経路	管種	使用年代	最終地点への送水量 (l/s)
図-5	木管（正方形断面）	1632年～1634年	4.0
図-6	木管（正方形断面）	1634年～18世紀後半	2.4
図-7（図-8）	木管（円形断面）	18世紀後半～1843年	1.7
図-9	石管（円形断面）	1843年～幕末	15.0

4. おわりに

辰巳用水の兼六園付近から金沢城における逆サイフォン部の布設状況の変遷とそれぞれの管路の流量を算出した。本研究の結論を要約すると以下ようになる。

1) 絵図とその作成時期（年代）から、辰巳用水の建設当初から逆サイフォン部が廃止された時期までの経路の変遷を明らかにした。

2) 2. で明らかにした管経路について、最終導水地点における供給流量を算定した。特に、石管への布設替えが大幅な流導水量の増加をもたらしたことがわかった。

3) それぞれの時期における管路経路について時代背景を考慮しつつ、現在の管路の水密性などを考慮すると霞ヶ池から二の丸まで導水していた経路での復元が比較的容易であることがわかった。

謝辞: 本研究を遂行するにあたり、多大な協力を賜りました「辰巳用水にまなぶ会」各位及び元本学学部生・畦地亮多君（現・石川県能美市役所）に感謝の意を表します。また（財）北陸地域づくり協会の助成を受けましたことに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 青木治夫：辰巳用水にみる先人の匠，p. 77，1993.
- 2) 金沢市提供資料：都市計画図.
- 3) 寛文7年図：<https://trc-adeac.trc.co.jp/Html/ImageView/1700105100/1700105100100060/kanbun-kanazawa> / (2015/11/13 アクセス).
- 4) 延宝金沢図：
<https://trc-adeac.trc.co.jp/Html/ImageView/1700105100/1700105100100060/enpo-kanazawav2/index.html>
(2015/11/13 アクセス).
- 5) 青木治夫：第4回日本土木史研究発表会論文集 辰巳用水と兼六園，pp. 15-16，1984.
- 6) 青木治夫：第4回日本土木史研究発表会論文集 辰巳用水と兼六園，p. 16，1984.
- 7) 青木治夫：辰巳用水にみる先人の匠，pp. 111-112，1993.
- 8) 青木治夫：辰巳用水にみる先人の匠，pp. 112-116，1993.
- 9) 青木治夫：第4回日本土木史研究発表会論文集 辰巳用水と兼六園，p. 16，1984.
- 10) 青木治夫：辰巳用水にみる先人の匠，p. 125，1993.
- 11) 青木治夫：辰巳用水にみる先人の匠，p. 111，1993.
- 12) 青木治夫：辰巳用水にみる先人の匠，pp. 114-116，1993.
- 13) 井上鋭夫：金沢城址の発掘，p. 19，1969.
- 14) 作者不明：金沢城図，1720.
- 15) 金沢市立玉川図書館近世資料館提供：学校御絵図，1800.
- 16) 金沢市立玉川図書館近世資料館提供：竹沢御殿御引移前総図絵図，1822.
- 17) 作者不明：御城中巻分基絵図，1832.
- 18) 作者不明：御城分間御絵図，1850.
- 19) 青木治夫：辰巳用水にみる先人の匠，p. 121，1993.
- 20) 青木治夫：第4回日本土木史研究発表会論文集 辰巳用水と兼六園，p. 16，1984.
- 21) 辰巳用水の才：<http://suido-ishizue.jp/nihon/03/01.html>
(2015/06/23 アクセス).
- 22) 青木治夫：辰巳用水にみる先人の匠，p. 111，1993.
- 23) 地理院地図(電子国土Web)：
<http://maps.gsi.go.jp/#5/35.371135/138.735352>
(2015/11/20 アクセス).
- 24) 玉井信行、山田朋彦：辰巳用水の建設目的に関する逆サイフォン送水量から見た検討、土木史研究講演集，Vol. 26，pp. 153-159，2006.
- 25) 玉井信行、有田正光：大学土木水理学，オーム社，pp. 127-129，2014.

(2016. 4. 11 受付)