

角倉了以の保津川航路開削時に設置された「水寄せ」に関する調査（第二報）*

Field survey on the old spur dykes set up by Suminokura Ryoi for the navigation in Hozu River : Part 2

浅野 貴弘**, 石垣 泰輔***, 川中 龍児****

By Takahiro ASANO, Taisuke ISHIGAKI and Ryuji KAWANAKA

概要

現在、保津川は保津川下りの区間として有名であるが、保津川において通船が行われるようになったのは角倉了以が1606年に保津川航路開削工事を行ってからである。角倉了以は川幅が広く、水深が浅いところに、石を集めて川幅を狭めて水深を深くするための「水寄せ」と呼ばれる石積み構造物を設置し、現在でも保津川の川の瀬に多くの水寄せが現存している。本研究では、既報の研究¹⁾に続き、現地調査の結果を用いて水寄せの石積みに関する安定性の検討ならびに水理実験による水寄せ周辺流れの検討を行ったので、ここに報告する。

1 はじめに

保津川は淀川水系の三大支川の一つである桂川（流路延長：114km、流域面積：1152km²）の一部で、亀岡市の保津橋から保津峡を貫流して京都市西部嵐山の渡月橋までの区間の河道について古くから使われる呼び名である¹⁾。現在、保津川は保津川下りの区間として有名である。しかし、近世初期までの保津川は、筏流しによる材木輸送が主で、保津峡という自然の要害が通船をさまたげていた²⁾。そこで、角倉了以は、保津川を用いて丹波から京都に米や薪炭といった物資を船で輸送するために、1606年に保津川航路開削工事を行った。角倉了以による保津川航路開削工事は慶長11年3月から8月のわずか5ヶ月で行われたと記録されている。角倉了以は川幅が広く、水深が浅いところに、石を集めて川幅を狭めて水深

を深くするための石積み構造物を設置した。この石積み構造物は保津川下りの船頭さんに「水寄せ」と呼ばれており、現在でも保津川の瀬に多く現存している。しかし、多くの水寄せはモルタルや矢板で補強されており、設置当時の形状を残しているとはいえない。朝日ヶ瀬と呼ばれる瀬に現存する水寄せは、上流側に右岸から水路中央に突き出したものと、下流側に水路中央部に存在するものの二連から構成されており、唯一、角倉了以が約400年前に設置した当時の形状を残しているといわれている。

既報の研究¹⁾では、朝日ヶ瀬の水寄せを対象とした調査結果を報告した。調査内容としては、上流側の水寄せと下流側の水寄せの位置関係の測量、水寄せ周辺流速の計測、上下流側双方の水寄せの横断面形状の測量を行い、それぞれに関して調査結果が報告した。これらの調査結

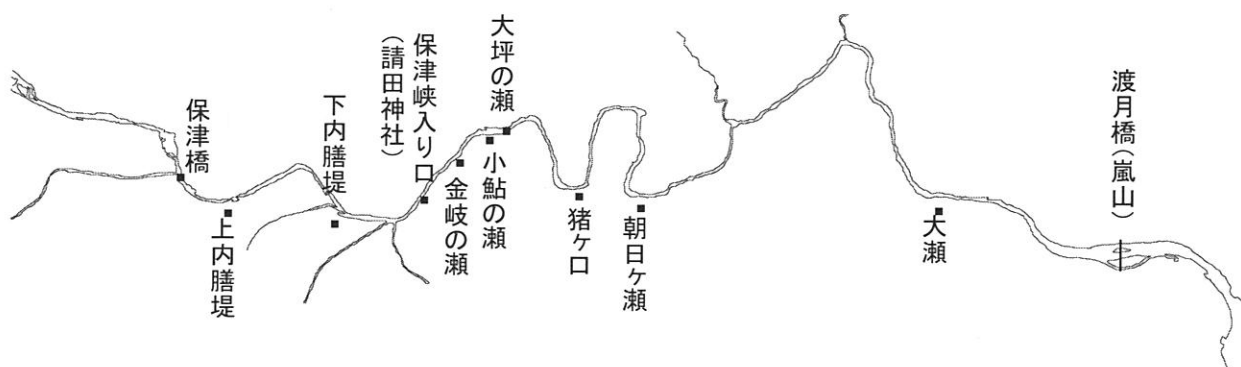


図-1 保津川調査範囲（作成：著者）

*keywords：保津川，角倉了以，石積み河川構造物「水寄せ」

**学生会員 関西大学大学院工学研究科 ソーシャルデザイン専攻（〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35）

***正会員 博士（工）関西大学環境都市工学部 都市システム工学科（〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35）

****学生会員 関西大学大学院 総合工学専攻（〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35）



写真-1 朝日ヶ瀬の水寄せ[上流側] (撮影: 著者)

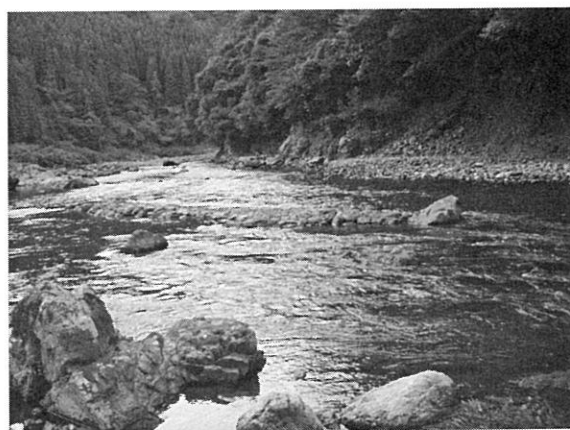


写真-2 朝日ヶ瀬の水寄せ[下流側] (撮影: 著者)



写真-3 大瀬の水寄せ[下流端付近] (撮影: 著者)

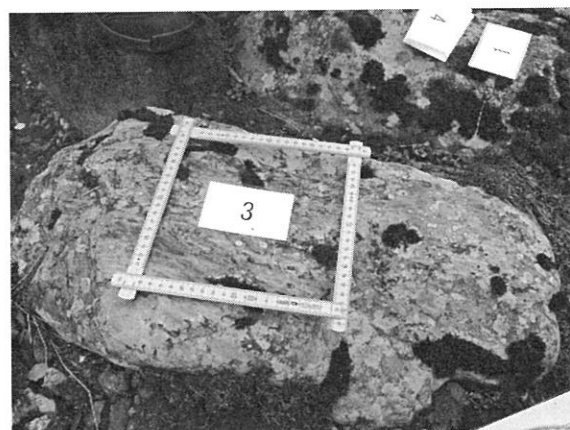


写真-4 計測に用いた標本例 (撮影: 著者)

果より、朝日ヶ瀬の水寄せが航路水深を維持するために設置された石積み構造物であることが確認された。また、他地点に現存する水寄せとは異なり、モルタル等による補強がなされていないことが確認できた。しかし、朝日ヶ瀬に現存する水寄せが、約 400 年間もの長い間、現存した要因が考察されておらず、また、その水理機能の検討もなされていない。

本報告では、研究の第二段階として、2007 年 10 月 17 日ならびに 2007 年 12 月 25 日に行われた調査結果を以下示す。さらに、調査結果を用いて石積みの安定性に関する検討を行い、朝日ヶ瀬の水寄せが約 400 年間現存した要因を考察する。また、水寄せ周辺流れを検討するために水理実験を行ったのでここに報告する。

2 調査結果

2.1 調査概要

本研究の調査対象範囲を図-1 に示す。流れ方向は図の左から右である。本研究で対象とした水寄せは、朝日ヶ瀬と大瀬と呼ばれる瀬に存在する。朝日ヶ瀬に現存する上流側の水寄せを写真-1 に、下流側の水寄せを写真-2 にそれぞれ示す。また、モルタル等で補強された水寄せの例として大瀬と呼ばれる瀬に現存している水寄せの調査も行った。写真-3 に大瀬に現存する水寄せを示す。

調査にあたっては、大瀬に関しては下流の嵐山から徒

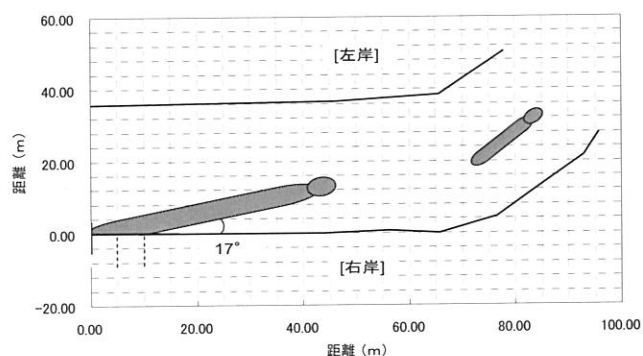


図-2 朝日ヶ瀬の水寄せの位置関係 (作成: 著者)

歩で行くことが可能であるが、朝日ヶ瀬に関しては徒歩で行くことが困難であるため、ラフティングボートを用いた。本調査の目的は、朝日ヶ瀬の上下流側の水寄せの縦断面形状の計測ならびに水寄せを構成する石の短径と長径の計測である。計測結果を用いて石の粒径、重量を算出した。なお、石の計測に関しては、上下流側の朝日ヶ瀬の水寄せからそれぞれ 30 個、大瀬の水寄せから 30 個を任意に抽出して計測を行った。写真-4 に抽出した石の例を示す。

2.2 水寄せに関する調査結果

図-2 に朝日ヶ瀬の上下流側の水寄せの位置関係を示

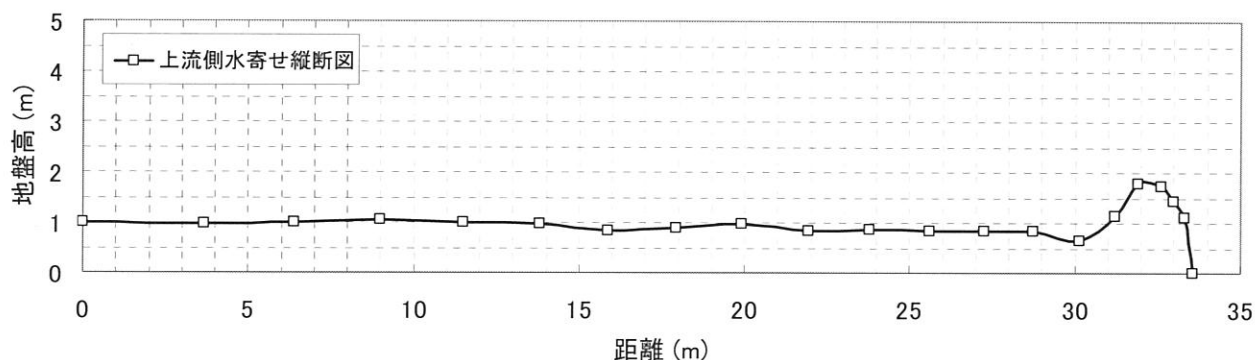


図-3 朝日ヶ瀬上流側水寄せ縦断面図 (作成：著者)

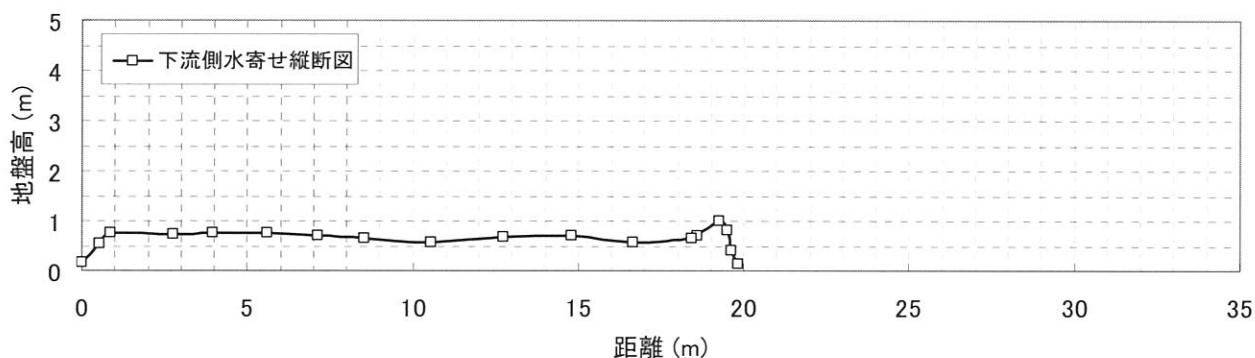


図-4 朝日ヶ瀬下流側水寄せ縦断面図 (作成：著者)

す。写真-1 に示す朝日ヶ瀬の上流側水寄せは、右岸より水路中央に突き出した石積み構造物で、頭部が下流側に傾いた下向き水制³⁾と同じ機能を有するものである。この水寄せは右岸の水際線と約 17 度傾いており、その長さは約 45m である。写真-2 に示す朝日ヶ瀬の下流側水寄せは水路中央に存在するものであり、上流側の水寄せにより刎ねられた流れをさらに対岸側に刎ねるように設置されており、その長さは約 20m である。また、これらの二つの水寄せの間は約 25m 離れており、流れが水寄せ間を抜けるような設置になっている。一方、写真-3 に示す大瀬の水寄せは、航路の両側に二つの石積み構造物を設置し、河道を狭めて航路水深を維持するような配置をとっており、二つの石積み構造物間の距離は約 7m であった。

図-3、4 に朝日ヶ瀬の上下流側の水寄せの縦断面形状図を示す。各水寄せの縦断面形状計測に関してはレーザー距離計 (Laser Technology 社製) を用いた。図-2、3 より、朝日ヶ瀬の水寄せに関しては、上下流側ともに下流端の地盤高が高くなっていることがわかる。これは、朝日ヶ瀬の水寄せが上下流側のいずれの水寄せも、既存の大岩を下流端とし、その上流側に石を積み並べた構造になっているためである。また、大瀬の水寄せに関しても下流端に大岩を確認することができた。しかし、近年、モルタルや矢板を用いて補強されている多くの水寄せに関し

ては、同程度の粒径の石を積み並べた構造になっており、下流端に大岩が存在していないものがほとんどである。これらの点が、約 400 年間その形を残して現存しているといわれている朝日ヶ瀬の水寄せと大きく異なる点である。

図-5 に本調査で計測した石の粒径分布を示す。図には上下流側の朝日ヶ瀬の水寄せならびに大瀬の水寄せを構成する石の粒径分布を併記した。水寄せを構成する石の粒径の算出に関しては、石を球と仮定し、次式を用いて石の粒径を算出した。

$$d = \frac{a+b}{2} \quad (1)$$

ここに、 d : 石の粒径、 a : 石の長径、 b : 石の短径を示す。また、朝日ヶ瀬の上下流側の水寄せ、大瀬の水寄せを構成する石の平均粒径 d_m はそれぞれ、 $d_m=55.0, 41.6, 41.4(\text{cm})$ となり、それぞれの水寄せを構成する石の中央粒径 d_{50} の値とほぼ一致した。また、平均粒径 d_m を用いてそれぞれの水寄せを構成する石の平均重量 W_m を算出すると、それぞれ、 $W_m=0.32, 0.11, 0.13(\text{t})$ となった。これらのことから、朝日ヶ瀬の上流側の水寄せを構成する石の粒径分布ならびに重量が他の水寄せを構成する石よりも大きな値を示していることがわかる。朝日ヶ瀬の上流側の水寄せは、付け根部分と先端部分の石積み方法に違いが見られるが、その詳細については今後調査が必要

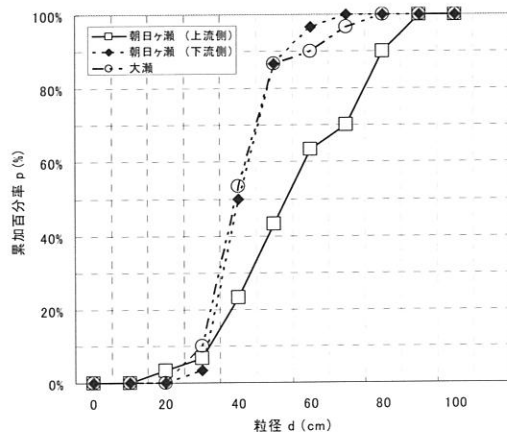


図-5 石の粒径分布 (作成: 著者)

である。一方、図-5より朝日ヶ瀬の下流側水寄せを構成する石の粒径分布と大瀬の水寄せを構成する石の粒径分布が近似していることがわかる。このことより、朝日ヶ瀬の下流側水寄せと大瀬の水寄せは同粒径程度の石が積み並べて造られたものであることがわかる。また、大瀬付近の河岸にある石の測定を行ったところ、大瀬の水寄せの粒径とほぼ一致した。よって、朝日ヶ瀬の下流側、大瀬、双方の水寄せは、河岸に存在する同程度の粒径をもつ石を積み並べて造られたものであると考えられる。

3 石積みの安定性に関する検討

本調査で得られたデータを用いて水寄せに関する安定性の検討を行う。検討に関しては、水寄せを構成する石が流出する流速を算出した。水寄せを構成する石が流出する流速の算出に関しては国土技術研究センターによる護岸の力学設計法⁴⁾に従った。本研究では、法覆工の力学的安定性の照査に用いられる流体力による掃流を対象とした一体性が弱い部材からなる法覆工モデルと一体性が強い部材からなる法覆工モデルの双方を用いた。前者は法覆工に用いる部材が単体として設置されたモデルであり、また、後者は法覆工に用いる部材が面的に設置された状態をモデル化したものである。一体性が弱いモデルにおける安定照査式を式(2)に、一体性が強いモデルを用いた場合の安定照査式を式(3)にそれぞれ示す。

$$d = \frac{1}{E_1^2 \cdot 2g \left[\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right]} V_0^2 \quad (2)$$

$$d \geq V_0^2 / \left[\{6.0 + 5.75 \log_{10}(H_d / k_s)\}^2 \cdot \tau_{sd} \cdot s \cdot g \right] \quad (3)$$

ここに、 d_m : 石の平均粒径、 E_1 : 乱れの強さを示す実験係数(文献⁴⁾に従い、流れの乱れが大きい係数 $E_1=0.86$ を用いた)、 H_d : 設計水深、 k_s : 相当粗度(本研究では $k_s=d_m$ とした)、 τ_{sd} : 傾斜補正を行ったシールズの限界掃流力(簡単のため、水寄せの斜面を0度と仮定した場合の値 $\tau_{sd}=0.05$ を用いた)、 s : 河床材料の水中比重である。式(2)、(3)を用いて水寄せを構成する石が流出する流速

を算出する式を求めると一体性が弱いモデル、一体性が強いモデルそれぞれ式(4)、(5)のようになる。なお、水寄せを構成する石が流出する流速に関しては流出した標本すべてに関して算出するため、平均粒径 d_m を標本の粒径 d として算出した。

$$V_0 = \sqrt{d \cdot E_1 \cdot 2g \left[\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right]} \quad (4)$$

$$V_0 = \sqrt{d \cdot \left\{ 6.0 + 5.75 \log_{10}(H_d / k_s) \right\}^2 \cdot \tau_{sd} \cdot s \cdot g} \quad (5)$$

ここで、式(5)に示す設計水深 H_d に関しては、それぞれの石に対して式(4)で石が流出する流速を算出したのちに水寄せが存在する河道を長方形断面と仮定し、マンニング式を用いて算出した。

図-6に一体性が弱いモデルを用いたときに算出された水寄せを構成する石が流出する流速の分布を、図-7に一体性が強いモデルを用いたときに算出された水寄せを構成する石が流出する流速の分布を示す。図-6、7ともに朝日ヶ瀬の上下流側ならびに大瀬の水寄せを構成する石が流出する流速の分布を併記した。図-6、7より、朝日ヶ瀬の上流側の水寄せを構成する石が流出する流速が他の水寄せを構成する石が流出する流速よりも大きな値になっている。これは、式(4)、(5)と図-5より、石が流出する流速は石の粒径に比例しているため、朝日ヶ瀬の上流側の水寄せを構成する石が流出する流速が速くなることがわかる。同様に、朝日ヶ瀬の下流側ならびに大瀬の水寄せを構成する石が流出する流速の分布が近似することも説明することができる。

図-6より、一体性が弱いモデルを用いた場合の石が50%流出する流速は朝日ヶ瀬の上下流側の水寄せならびに大瀬の水寄せそれぞれ、 $V_0=3.6, 3.1, 3.1(\text{m/s})$ となった。一方、図7より一体性が強いモデルを用いた場合の石が50%流出する流速は朝日ヶ瀬の上下流側の水寄せならびに大瀬の水寄せそれぞれ、 $V_0=8.4, 7.3, 7.3(\text{m/s})$ となった。一体性が弱いモデルと一体性が強いモデルとを比較すると、石が50%流出する流速は一体性が強いモデルを用いて算出した値が約2.3倍大きくなった。水寄せは、石を積み並べて造られているが、ただ石を並べただけでなく、粒径の大きな石と石の間に粒径の小さな石を詰め込み、城郭の石垣のような構造になっている。そのため、水寄せを構成する石が単体ではなく、石が面的に設置されているものであると考えられる。よって、水寄せは一体性が強いモデルとして検討することが妥当であるといえる。

ここで、一体性が強いモデルを用いて算出した水寄せが崩壊する流速に着目すると、 $V_0=8.4, 7.3, 7.3(\text{m/s})$ となっているが、このような高速の流れが生起するかどうかを検討するには今後、河床勾配等の現地調査が必要であるが、地形図より試算した河床勾配から判断すると、このような高速流が生起する可能性は低いといえる。この観点より、このような高速流に耐える構造を有すること

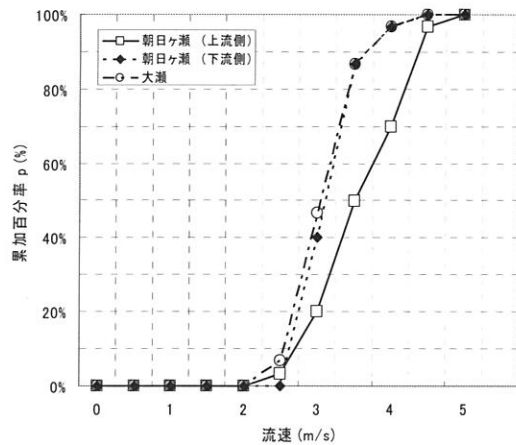


図-6 石が流出する流速（一体性が弱いモデル）
（作成：著者）

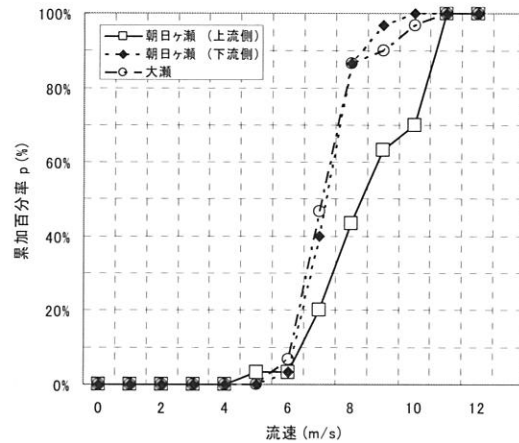


図-7 石が流出する流速（一体性が強いモデル）
（作成：著者）

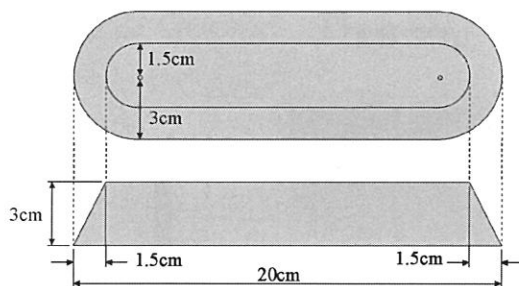


図-8 水寄せ模型図 （作成：著者）

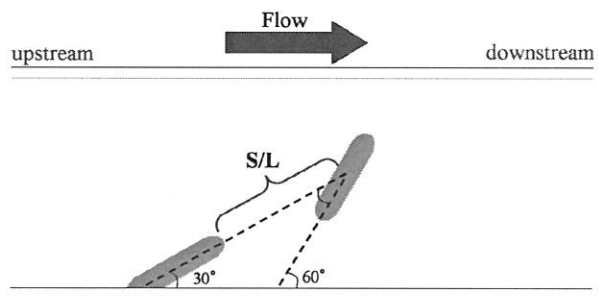


図-9 水寄せ模型配置図 （作成：著者）

表-1 実験条件

ケース	S/L	上流側設置角度(°)	下流側設置角度(°)	Dr	Q(l/s)	水寄せ
1	1	30	60	1	5	非越流
2	1	30	60	2	15.5	越流

S: 水寄せ間隔, L: 下流側水寄せ長, Dr: 相対水深, Q: 流量

が、長年形状を保ってきた要因であるといえる。

4 実験的検討

朝日ヶ瀬の水寄せの周辺流れを検討するために、固定床水理実験を行った。本実験においては、幅 50cm、深さ 25cm、長さ 15m の流量制御装置付き実験水路を用いた。また、この実験水路の水路勾配は $I=1/1000$ とした。さらに、水寄せ模型は水路中央付近に設置し、水路の左岸側が朝日ヶ瀬付近の航路になるようにした。なお、水寄せ模型はモルタルを用いて作成し、諸量等の詳細は図-8 に示す。また、図-9 に示すように、水寄せ模型の設置に関しては、上流側に右岸から突き出したものと、河道中央部に存在するものの二連構造とし、上流側で勿ねられた流れを下流側の水寄せで受ける配置とした。

本実験では二次元電磁流速計による水寄せ周辺流速計測を行った。計測点に関しては、横断方向、流下方向にそれぞれ 19 点、11 点とした。また、測点 1 点当たり 25 秒間で 500 個のデータを記録し、その平均値をその点の

流速とした。

実験条件は、表-1 に示すように、非越流状態と越流状態の 2 ケースを設定した。以下の結果は、水深と水寄せ高の比である相対水深 Dr で整理して示しており、 $Dr=1$ が非越流状態、 $Dr=2$ が越流状態である。また、 S/L は、水寄せ間隔を下流側水寄せ長で除して無次元化したものである。表-1 に示すように、本実験では流量を非越流状態、越流状態それぞれ $Q=5, 15.5(l/s)$ とした。この値は、予備実験で流量検定を行った結果である。

図-10 に本実験で計測した流速分布図を示す。また、計測した流速を、断面平均流速を用いて無次元化したものを図-11 に示す。なお、流速の計測点に関しては、水寄せ高 z を水路底面から計測点までの距離 H で除した z/H で示した。図-10, 11 より、非越流時では、下流側水寄せ付近から左岸側の流速が速くなっていることがわかる。これは、上流側の水寄せによって勿ねられた流れがさらに対岸側に勿ねられたためであると考えられる。

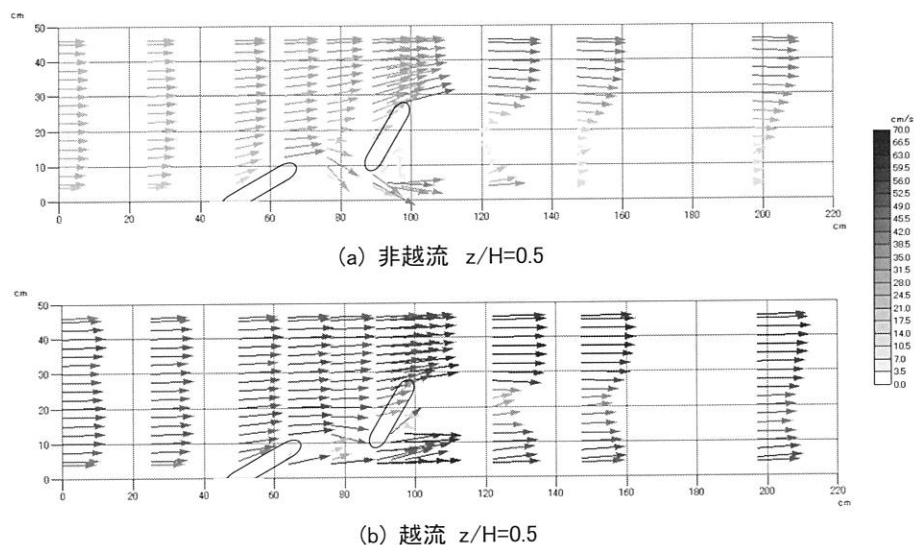


図-10 流速分布図(ベクトル図) (作成:著者)

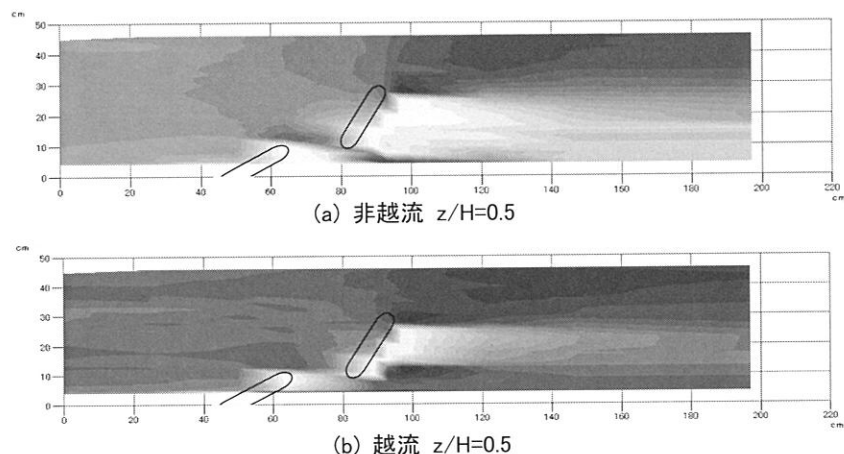


図-11 流速分布図(無次元化) (作成:著者)

よって、本実験において、朝日ヶ瀬の水寄せがもつ水刼ね効果を確認することができた。一方、越流時では下流側水寄せの下流端付近の流速が他の箇所よりも顕著に速くなっていることがわかる。そのため、洪水時に下流側水寄せの下流端付近に最も強い流体力がかかることが予想される。しかし、2 で述べたように、朝日ヶ瀬の上下流側水寄せは、下流端には既存の大岩が存在しており、洪水時の流体力に耐えうるものと考えられる。このことから、本実験結果においても、約 400 年間、朝日ヶ瀬の水寄せが現存した要因になる。

5 おわりに

本研究では、保津川に現存する石積み構造物「水寄せ」に関する調査を行い、その結果を用いて河川工学的検討を行った。調査内容としては、朝日ヶ瀬の上下流側水寄せの縦断面形状の計測ならびに朝日ヶ瀬の上下流側、大瀬の水寄せを構成する石の計測を行った。水寄せを構成する石の計測結果を用いて、水寄せを構成する石が流出

する流速の算定を行った。その結果、朝日ヶ瀬、大瀬双方の水寄せが崩壊する流速は、生起する可能性が低い高速度であることがわかった。さらに、水寄せ周辺流速計測を行い、水寄せ周辺流れの検討を行った。以上の結果から、朝日ヶ瀬の水寄せが約 400 年間現存した要因を検討した。今後、移動床水理実験ならびに PIV 解析を行い、水寄せ周辺の洗掘特性ならびに水寄せ周辺の内部流況を検討する予定である。

参考文献

- 1) 石垣泰輔, 馬場康之, 川中龍児, 桑岡健太郎: 角倉了以の保津川航路開削時に設置された「水寄せ」に関する調査, 土木史研究講演集, Vol.26, pp.343-345, 2006.
- 2) 亀岡市立保津文化センター: 「保」と「津」その歴史からみえるもの, 2005.
- 3) 山本晃一: 日本の水制, 山海堂, 1996.
- 4) 国土技術研究センター: 護岸の力学設計法 (財) 国土技術研究センター編, 山海堂, 1999.