

# 砂防溪流三野畑川における水車製作と 機能維持に関する工学的検討

神田 佳一\* 渡部 守義\*

Engineering Investigation of the Manufacture and Maintenance Functions of a Water  
Mill in an Erosion Control Current on the Minohata River

Keiichi KANDA, Moriyoshi WATANABE

## ABSTRACT

An erosion control current of the Minohata River basin located in Goshiki-cho, Tsuna County, Hyogo Prefecture was heavily damaged by Typhoon No. 23, which struck the area in October 2004, causing water immersion and sediment disasters. At present, remedial work has been promoted extensively. For use as the stepping stone to restoration and to rehabilitation of the river basin, and with the collaboration of residents who once inhabited the area, Hyogo Prefecture has planned construction of a pocket park, the Sirasunomori water mill park, in a vacant area of private homes that had been destroyed by the typhoon. A water mill will serve as the park's symbol.

The present study is a funded research project sponsored by Hyogo Prefecture. It is aimed at designing and manufacturing a water wheel driven normally under flow-rate conditions at ordinary water-levels. The study is intended to assess the wheel and maintenance control of the water wheel from engineering viewpoints.

**KEY WORDS:** erosion control, conventional water wheel, creativity education

## 1. はじめに

兵庫県津名郡五色町（現洲本市）の砂防溪流三野畑川流域は、平成 16 年 10 月の台風 23 号により、浸水・土砂災害等甚大な被害を受けており、現在復旧工事が鋭意進められている。兵庫県では、河川流域の復旧から復興への足がかりとして、周辺住民の協力のもと流失した民家の跡地を活用し、白巢城跡への登山道の出発点に位置する大木橋下流に水車小屋（図-1）をシンボルとするポケットパーク（白巢の森水車公園）を整備することとした。



図-1 水車小屋のイメージ図

\*都市システム工学科

水車の設置に際しては、周辺の里山の林や流域の棚田が連なる景観を損なうことなく地域住民の憩いの場となるとともに、水車の動力を利用して地元の鮎原米を精米することにより、観光スポットとしての役割を果たすことが望まれる。しかしながら、水車設置地点の河川流量は、平水時で  $Q=0.003 \sim 0.004 \text{m}^3/\text{s}$  と少なく、公園面積や既設道路の線形などの制約により、有効落差が最大でも  $H=2.5\text{m}$  程度であって、常時水車を稼働させるには、水車の稼働効率を最大限に高める必要がある。

本研究は、兵庫県淡路県民局県土整備部からの受託研究として、平水時の流量条件のもとで、必要な動力を持って稼働する水車を設計・製作するとともに、その機能の維持・管理に関する工学的検討を行った成果をまとめたものである。尚、水車の製作においては、都市システム工学科第4学年の創造性教育科目「工学演習」の課題として実施したものである。

## 2. 水車の設計条件と形式・諸元の決定

### 2.1 三野畑川及び水車設置地点の概要

三野畑川は、標高 317m の白巢山を水源として五色町鮎原で 2 級河川都志川に合流する砂防河川である。最上流部は、「白巢お城の森」整備区域に指定されている山岳地域で、上流より夫婦池、新池及び瀬戸池の 3 つの灌漑用ため池がある。瀬戸池の下流部は、田畑や家屋の近傍を急勾配で蛇行しながら流下する川幅が数m の溪流である。

平成 16 年 10 月の台風 23 号による降雨は、近隣の洲本雨量観測所で日雨量 309mm/day、時間最大雨量 72mm/hr を記録した。三野畑川流域では、上流の 3 つのため池が連続して決壊するとともに、氾濫した洪水や土砂により家屋 1 棟、護岸延長 271m が流失した他、床上浸水 9 棟、田畑の浸水被害 7ha に及ぶなど、甚大な被害が生じた。このため、決壊した瀬戸池から大木橋までの間 274m が砂防災害関連事業区間、その下流部三野畑橋までが災害復旧事業区間として指定された。水車の設置地点は、災害復旧事業区間上流端の大木橋の直下流である。水車用水は、水車設置地点の 47.5m 上流の三野畑川左岸に設けた取水口から取水し、暗渠（管径 0.3m、長さ 27.5m）及び U 字溝（幅 0.3m、長さ 15.5m）から

なる導水路を通して水車上流の樋に導水される。樋の下流端と水車下部の排水路との有効落差は  $H=2.4\text{m}$  である。

### 2.2 水車の形式と稼働効率

水車は、水平軸に取り付けられた羽根車に水を流入させ、その位置及び運動エネルギーによって羽根車を回転させて機械的エネルギーを得るものである。羽根車は、水を受ける羽板、側板、底板とそれらを回転軸に接続するアームで構成される。水車の形式は、羽根車への水の流入位置によって、上掛け水車、逆掛け水車、中掛け水車及び下掛け水車などに分類される。

上掛け水車は、羽根車の上部から水を落とし、主として水受け内を満たしている水の重量によって羽根車を流入水の方向と同じ方向に回転させるものである。上掛け水車の場合、回転する羽根車の直径以上の落差が必要となる。羽根車の頂点よりも少し上流側に水を流入させ、流入水の方向と逆方向に回転させるものを逆掛け水車と呼ぶ。逆掛け水車では、羽根車の回転方向と排水路の流れ方向が同じであるため、羽根車の下部が排水路内に浸水する場合にも効率が良い。中掛け水車は、羽根車の中心近くで水を流入させるもので、水受け内の水の重量と運動エネルギーの両方を利用するものである。下掛け水車は、羽根車下部の羽根板に流水を衝突させ、水の運動エネルギーを動力に変えるものであって、水路内に設置され、側板の無いものが多い。

水車の動力エネルギー  $L_T[\text{kW}]$  は、有効落差を  $H[\text{m}]$ 、流入水の流量を  $Q[\text{m}^3/\text{s}]$ 、水の密度を  $\rho[\text{kg}/\text{m}^3]$ 、重力の加速度を  $g[\text{m}/\text{s}^2]$  とすると、次式で表される。

$$L_T = \frac{\rho g Q H}{1000} \quad (1)$$

ここで、有効落差  $H$  は、導水路と排水路の水面差を  $H_0$ 、導水路端の平均流速を  $V[\text{m}/\text{s}]$  とすると、

$$H = H_0 + \frac{V^2}{2g} \quad (2)$$

である。

一方、杵を上下させるために必要な動力  $L_K$  は、単

位時間あたりに持ち上げる杵の質量  $M[\text{kg}]$  と持ち上げ高さ  $h[\text{m}]$  の積で表される。即ち、水車の単位時間あたりの回転数を  $M[\text{rpm}]$ 、杵を持ち上げるなで棒の本数を  $z$ 、杵の本数を  $k$  とすると、 $L_K[\text{kW}]$  は次式となる。

$$L_K = \frac{kzghMN}{60 \times 1000} \quad (3)$$

実際に水車を稼働させる場合には、羽根車流入時の水の跳ねとび、回転軸と軸受けの摩擦や羽根車の空気抵抗などによって動力損失が生じるので、 $L_T$  は  $L_K$  よりも大きくとらねばならない。両者の比  $L_K/L_T$  を水車の稼働効率  $\eta$  と呼ぶ。 $\eta$  は水車の形式や羽根車の回転数によって異なるが、概ね表-1 のようである<sup>1)</sup>。

表-1 水車の最大稼働効率

水車の形式	水車の稼働効率 $\eta$
上掛け (逆掛け) 水車	0.5~0.7
中掛け水車	0.45~0.65
下掛け水車	0.15~0.35

### 2・3 水車の形式及び諸元の決定

今回の水車の製作における水理条件は、以下のようである。

流量  $Q=0.004\text{m}^3/\text{s}$

有効落差  $H=2.4\text{m}$  ( $=H_0$ : 流入水の水頭速度水頭  $V^2/2g$  を無視する)

また、一度に  $20\text{kg}$  程度の米を 1 日 8 時間稼働で精米するものとして、必要な動力系の諸量を以下のように設定した。

杵の質量  $M=25\text{kg}$

杵の本数  $k=2$  本

杵の持ち上げ高さ  $h=0.3\text{m}$

なで棒の本数  $z=2$  本

水車の回転数  $N=12\text{rpm}$

これらの諸量から、 $L_T$  及び  $L_K$  を算定すれば、

$$L_T = \frac{\rho g Q H}{1000} = 0.094\text{kW} \quad (4)$$

$$L_K = \frac{kzghMN}{60 \times 1000} = 0.059\text{kW} \quad (5)$$

したがって、要求される水車の稼働効率は、

$$\eta = \frac{L_K}{L_T} = \frac{0.059}{0.094} = 0.63 \quad (6)$$

となる。

一方、 $L_K$  を羽根車に作用するトルク  $T[\text{Nm}]$  と回転数  $M[\text{rpm}]$  との積で表わせば、

$$L_K = \frac{2\pi NT}{60 \times 1000} \quad (7)$$

となり、(5)、(6) 式より、必要なトルク  $T[\text{Nm}]$  は、次のようになる。

$$T = \frac{L_K \times 60 \times 1000}{2\pi N} = 47.0\text{Nm} \quad (8)$$

このトルクを得るには、水受けに溜まる水の重量を  $49\text{N}$  ( $0.005\text{m}^3$  の容積に相当) とすると、羽根車の半径  $R$  を  $1\text{m}$  程度にすればよいことになる。

以上のことから、水車の形式は、高い稼働効率が得られる逆掛け水車とし、羽根車の直径  $D$  は  $2\text{m}$  とした。羽根車の材料としては、高い耐久性を有し、かつ出来る限り摩擦や完成後の変形を小さくして稼働効率を高めるため、節の無い国内産檜の心材を用いることとした。

### 3 . 水車の製作

水車の製作工程は、現地測量、図面作成、材料の加工・組み立てである。材料は、伐採した木材を 2 ヶ月程度天日乾燥した後、室内乾燥養生、防腐処理を経て加工・組み立てを行った。材料の防腐処理は、周辺環境への影響を考慮して、防腐・防蟻に有効なジメチルジデシルアンモニウムを主成分とする透明薬剤を加圧注入する方法を用いた。薬剤の毒性は低く、重金属を含有していないので、焼却後も有害物を発生しない。各作業の様子を写真-1~8 に示す。



写真-1 水車設置前の現地の状況



写真-5 羽根車の組立て状況



写真-2 樋柱の組立て状況



写真-6 動力系（杵）の設置状況



写真-3 樋柱部材の加工状況



写真-7 水車の現地設置状況



写真-4 回転軸部材の加工状況



写真-8 完成した水車小屋

表-2 水車の稼働性能に関する実験結果

$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	$L_T$ (kW)	$M$ [rpm]			$L_K$ (kW)、 $[\eta]$		
		RunA	RunB	RunC	RunA	RunB	RunC
0.00174	0.0409	3.02	6.35	20.62	0.0148 [ $\eta=0.36$ ]	0.0156 [ $\eta=0.38$ ]	—————
0.00407	0.0957	12.91	19.55	25.21	0.0633 [ $\eta=0.66$ ]	0.0479 [ $\eta=0.50$ ]	—————
0.00767	0.1804	15.35	20.42	25.43	0.0752 [ $\eta=0.42$ ]	0.0500 [ $\eta=0.28$ ]	—————
0.00844	0.1984	15.50	20.84	25.61	0.0759 [ $\eta=0.38$ ]	0.0511 [ $\eta=0.26$ ]	—————

#### 4. 水車の性能に関する検討

完成した水車の稼働性能を評価するため、現地において流水の流量と水車の回転数との関係を調べる実験を行った。実験では、水車に杵を 2 本とも稼働させる場合 (RunA) と 1 本のみ稼働させる場合 (RunB)、及び杵を稼働させずに水車のみを回転させる場合 (RunC) の 3 つの負荷条件について、流量を 4 通りに変化させて水車の回転数  $M$ [rpm] を計測した。流量は、導水路 U 字溝内の平均流速と流水断面積を計測することにより評価した。実験結果を表-2 に示す。

実験結果から、流量  $Q$  と水車の回転数  $N$  との関係を図-2 に、流量  $Q$  と稼働効率  $\eta$  の関係を図-3 に示す。また、回転数  $N$  と稼働効率  $\eta$  との関係を示せば、図-4 のようである。

図-2 より、各負荷条件において、流量が増加すると水車の回転数も増加するが、ある流量を超えると回転数は増加しなくなることが分かる。杵を稼働させない場合 (RunC) における水車の最大回転数は  $N_{max}=25rpm$  程度、杵を 2 本稼働させた RunA では  $N_{max}=15rpm$  程度である。稼働効率についてみれば (図-3 及び図-4)、各負荷条件において、流量や回転

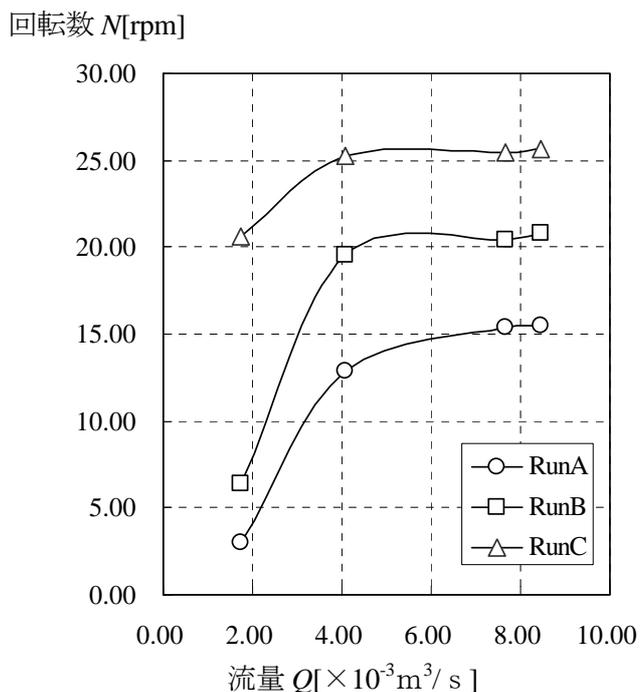


図-2 流量と回転数との関係

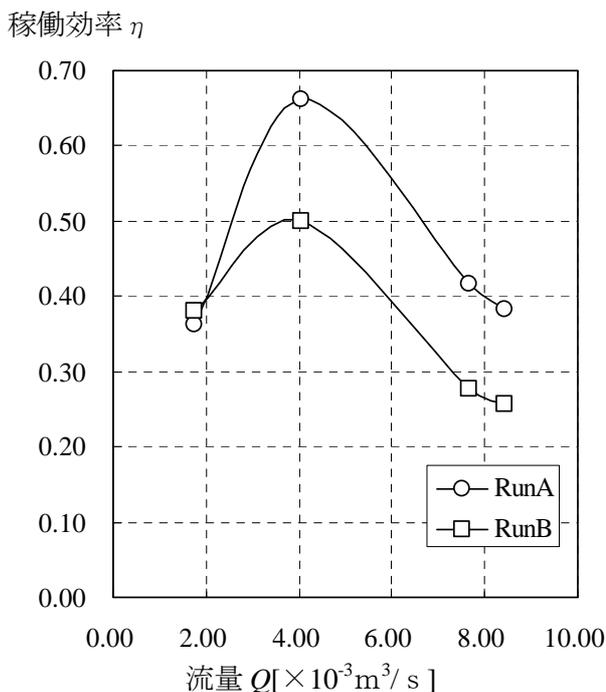


図-3 流量と稼働効率の関係

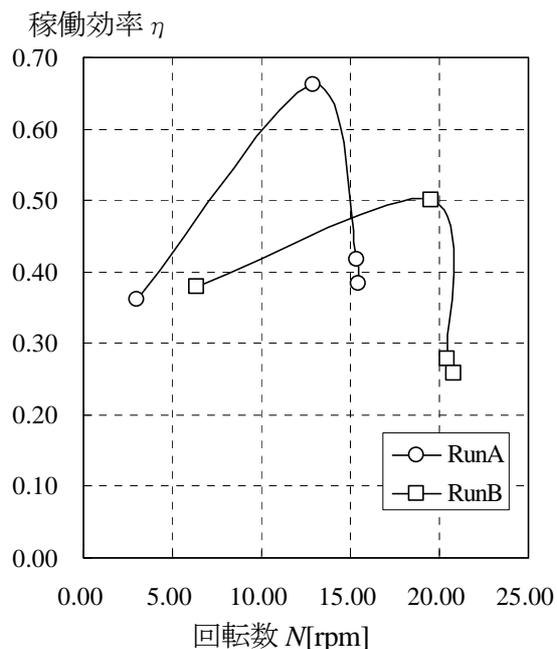


図-4 回転数と稼働効率との関係



写真-9 高流量時の水の跳ね飛び

数に対して極大値を持つ分布を示しており、RunAでは、 $Q=0.004\text{m}^3/\text{s}$ 、 $N=13\text{rpm}$ で稼働効率  $\eta$  が最大 ( $=0.66$ ) となっている。稼働負荷を小さくすると (RunB)、同じ流量に対して水車の回転数は増加するが、稼働効率は小さくなる。

以上の結果より、目標とした水車の回転性能 (流量  $Q=0.004\text{m}^3/\text{s}$  で回転数  $N=12\text{rpm}$ ) を達成することができたものと考えられる。ただし、流量が多くなると、写真-9に見られるように、羽根車流入時の水の跳ね飛びが大きくなり、稼働効率が著しく低下するので、今後の対策として水の流入高さを下げるなどの工夫が必要であろう。

## 5 . おわりに

本研究では、砂防溪流三野畑川大木橋下流のポケットパーク内に、平水時の流量条件のもとで、必要な動力を持って稼働する水車を設計・製作するとともに、その機能の維持に関する工学的検討を行った。製作した水車は、目標とした水車の回転性能を達成しており、十分にその機能を果たすものであった。

水車の製作にあたっては、(株) ザイエンス並びに北播磨小径木加工センターに技術指導を賜った。ここに、記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 藤原良樹・門久義・細川欽延：日本の産業用在来形水車に関する研究、技術と文明第 3 巻 2 号、pp.23-42、1986.