

## 水車動力の特性測定に関する一考察

榊原 聖文・中川 徹・雀部 晶

国立科学博物館 工学研究部

### A Consideration on the Measurement of Specific Characters of Watermill-power

By

Seibun SAKAKIBARA, Tohru NAKAGAWA and Akira SASABE

Department of Engineering, National Science Museum, Tokyo

#### I. 調査目的

水車の実態調査において、水車の形態的特徴に関する調査とともに、水車の特性を測定し、その特徴を知ることも重要である。出力の測定方法としてプロニー・ブレイキ法が一般に知られている。しかし、この方法は、実態測定に際しては、測定用機材の設置場所、水車回転軸への測定用器具の取付、稼働中の水車の長時間の運転中止等を必要とする。したがって、現場では歓迎されない方法であり、また水車の種類も多く、調査上多くの困難をともない実際的でない。それゆえ、簡便な機器、方法により現場に適した測定方法、算出方法が必要になる。そこで、適切な測定方法を明らかにするために、周期、角速度等基礎的の諸元を測定し、一応の結果を得たので以下に報告する。本調査は文部省科学研究費補助金による「わが国における水車稼働の実態調査および歴史的発展過程の実証的研究」の調査データによって行った。

#### II. 調査対象

調査日時 昭和55年2月  
調査場所 栃木県今市市小百1889  
水車所有者 赤松長治  
水車形態 胸掛式

#### III. 測定項目

##### 1. 水路について

水車取水路および放水路の水路幅 0.90 m, 水深 0.14 m, 流速 3.0~3.3 m/s (上流), 1.9 m/s (下流), 測定地点間の落差 2.24 m.

##### 2. 水車各部諸元

水輪直径 4.2 m (1台)  
水輪軸歯車直径 1.45 m (歯数 118 枚)

杵軸 (2 基) 歯車直径 0.9 m (歯数 72 枚)  
 水輪軸対杵軸歯数比  $\delta=1.638$   
 杵数 16 本 (8 本/1 基), 杵重量 45 kgw  
 杵のはね上り距離 0.30 m  
 杵と回転軸間距離 0.43 m  
 杵軸はね木数 3 本

### 3. 水車の特性

水輪回転周期  
 角速度 (杵数変化による負荷)  
 角加速度 (無負荷時)  
 水車出力  
 水車効率

## IV. 測定方法および測定器具

### 1. 水路関係

計測地点として、水車をはさんで水車でできるだけ近く、且つ流速が定常的である 2 地点を設定し、水路幅、水深等については水路断面を数点計測し水路断面積を算出した。流速は電気流速計により測定し、落差はトラシットにより計測した。

### 2. 水車関係

水車形状については直接計測し、杵重量はバネばかりにより計測、回転周期 (定常的) はストップウォッチにより計測、角速度の変化等過渡的現象については 8 mm 撮影機に記録し、エディターにコマ数計測装置をつけ、算出した。

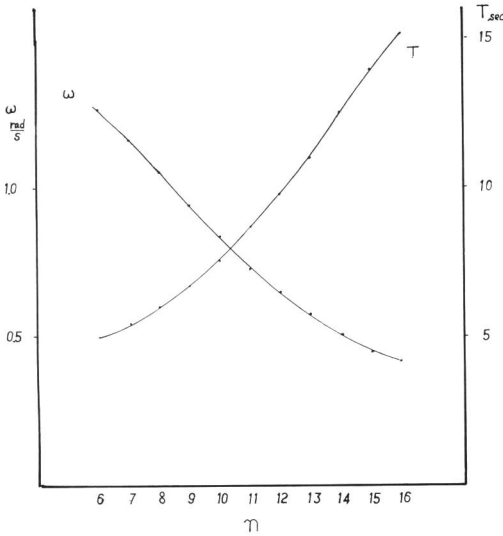
## V. 測定および結果

### 測定 1. 杵数と水輪の角速度特性

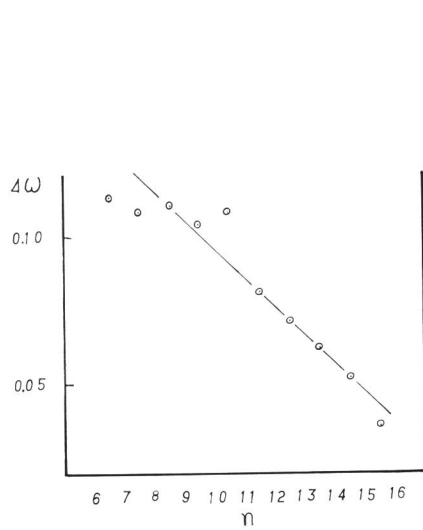
水車の回転主軸である水輪の回転速度と負荷 (杵数) の関係を知るために、杵数  $n$  (6~16 本 45 kgw/1 本) を変数とし、水輪の周期  $T$  をストップウォッチにより計測、水輪の角速度  $\omega$  を算出した。その結果は第 1 表第 2 欄第 3 欄および第 1 図の通りである。

第 1 表 水輪の回転周期と角速度

| 杵数 $n$ [本] | 周期 $T$ [sec] | 角速度 $\omega$ [rad/sec] | $\Delta\omega (= \omega_n - \omega_{n-1})$ | $\Delta^2\omega (= \Delta\omega_n - \Delta\omega_{n-1})$ |
|------------|--------------|------------------------|--|--|
| 6          | 4.95         | 1.266                  | -0.113                                     | -0.005   |
| 7          | 5.45         | 1.156                  | -0.108                                     | +0.002   |
| 8          | 6.00         | 1.048                  | -0.110                                     | -0.006   |
| 9          | 6.70         | 0.938                  | -0.104                                     | +0.004   |
| 10         | 7.55         | 0.834                  | -0.108                                     | -0.027   |
| 11         | 8.65         | 0.726                  | -0.081                                     | -0.010   |
| 12         | 9.75         | 0.645                  | -0.071                                     | -0.009   |
| 13         | 10.95        | 0.574                  | -0.062                                     | -0.010   |
| 14         | 12.50        | 0.502                  | -0.052                                     | -0.016   |
| 15         | 13.95        | 0.450                  | -0.036                                     |  |
| 16         | 15.15        | 0.414                  |  |  |



第1図 杵数に対する水車の回転周期および角速度特性



第2図 杵数対角速度の第一階差

この数値の第1階差  $\Delta\omega = \omega_n - \omega_{n-1}$ 、第2階差  $\Delta^2\omega = \Delta\omega_n - \Delta\omega_{n-1}$  を求め第1表、第4、第5欄に記し、 $\Delta\omega$  を第2図に示した。第1階差においてはほぼ直線的に減少し、特に杵数8~15本において顕著である。第2階差もほぼ一定とみることができ。そこで、杵数対角速度曲線を2次曲線と仮定し、

$$\omega_{(n)} = \omega_{(a)} + (n-a)\omega'_{(a)} + \frac{(n-a)^2}{2}\omega''_{(a)} \tag{1}$$

に測定値を代入した。

即ち、 $a=11, \omega_{(11)}=0.726, \omega'_{(11)}=0.0858$

杵数8~15本の第2階差の平均  $\omega''_{(a)}=0.00966$  とすると、次式が得られる。

$$\omega_{(n)} = 0.726 - 0.0858(n-11) + \frac{0.00966}{2}(n-11)^2 \tag{1}'$$

上式を  $n$  について整理し

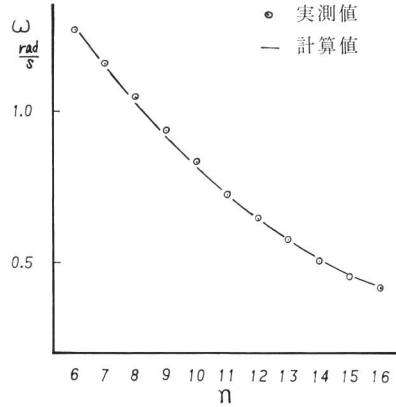
$$\omega_{(n)} = 4.83 \times 10^{-3} n^2 - 0.192n + 2.254 \tag{2}$$

の実験式を得た。

計算値と実測値を比較するため第3図に  $\omega$  の計算値を実線で示し、実測値を◎印で示した。最大誤差は約2.4%である。

この実験式から、杵数=0のときの最高角速度  $\omega_0=2.254$  rad/s が求められる。この計算値を測定2の結果と比較すると、約3.5%の差を生じている。

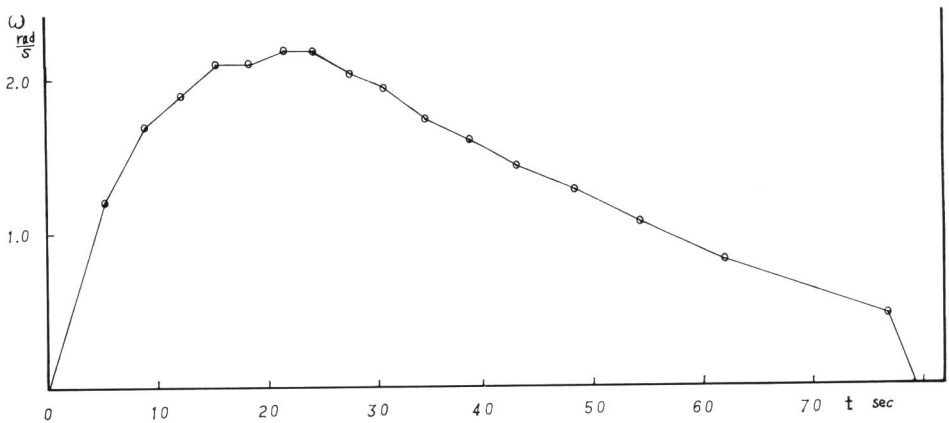
一方、角速度  $\omega_{(n)}=0$  になる最大杵数(19本)が算出できる。但し、実際上は、ある杵数のときの最大負荷トルクより水輪の回転トルクが小さいとき回転不能となるが、水車のトルクの発生機構は複雑であるので、これらについて今後検討を加えたい。



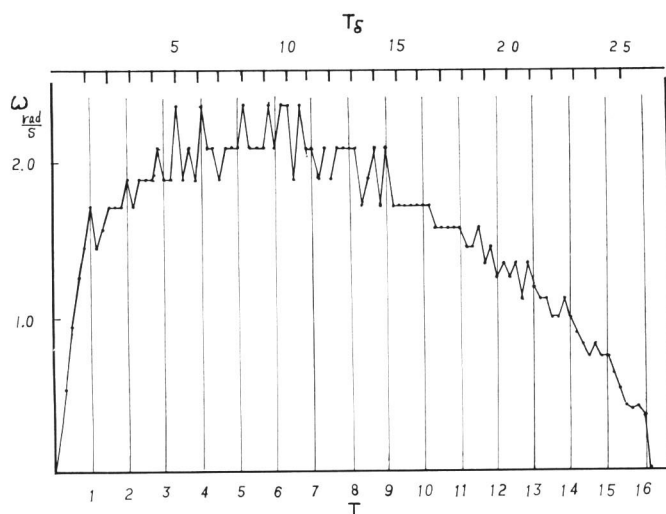
第3図 杵数対角速度の実測値と計算値の比較

### 測定 2. 無負荷時の水車の回転特性

無負荷時（杵数=0）の水車の特性を調べるため、静止中の水車に一定流速の水力を与えたときの水車（水輪）の回転速度の加速特性、および最高回転速度に到達後、流量=0にした場合の減速特性を8mm撮影機に記録し、算出した結果を第4図に示した。x座標は時間経過であり、y座標は角速度である。したがって、上昇曲線、および下降曲線の傾きは角加速度  $d\omega/dt$  を示している。この上昇曲線から水車の角加速度が一定ではなく、角速度の上昇にともない比例せず、減少していることがわかる。一方、下降曲線から、下降時の角加速度は一様ではないが、静止直前をのぞくと、角加速度  $d\omega/dt = -0.057 \sim -0.025$  の範囲であり、静止時は角加速度  $d\omega/dt = -0.21$  である。

第4図 無負荷時における角速度の変化特性曲線 ( $t=0$  流水,  $t=21$  sec より止水)

第5図は、これらの原因を知るために、第4図と同一データを使用し、x座標に水車（水輪）の回転周期を等間隔目盛（単位= $\pi/3$ ）で表わし、y座標に角速度  $\omega$  をとり、参考のためグラフ上部に杵軸の回転周期を等間隔で記した。このグラフから、最高角速度時に杵軸周期の影響をみることができる。



第5図 水輪軸および杵軸の回転数に対する角速度特性

### 測定 3. 水車出力および効率の測定

水車の出力  $N$  を算出するために、杵の重量  $M$ 、杵数  $n$ 、杵のはね上がり高さ  $h$ 、はねぎ本数  $n_a$ 、杵軸対水輪軸回転比  $\delta$ 、および、水輪軸周期  $T$  を測定し、(3) 式にもとづき算出した杵の出力を第2表第2欄に記載した。但し落下時における摩擦損失等は無視することとした。

第2表 水車出力と水車効率

| 杵数 $n$ [本] | 水車出力 $N$ [kW] | 水車効率 $\eta$ [%] |
|------------|---------------|-----------------|
| 6          | 0.793         | 7.4             |
| 7          | 0.840         | 7.8             |
| 8          | 0.872         | 8.1             |
| 9          | 0.870         | 8.1             |
| 10         | 0.867         | 8.1             |
| 11         | 0.833         | 7.7             |
| 12         | 0.806         | 7.5             |
| 13         | 0.777         | 7.2             |
| 14         | 0.733         | 6.8             |
| 15         | 0.704         | 6.5             |
| 16         | 0.691         | 6.4             |

$$N = \frac{Mghnna\delta}{T} \text{ [kW]} \quad (3)$$

また、水車の効率を  $\eta$  とし、流量  $Q$ 、落差  $H$  とするとき、水車出力  $N$  は一般に (4) 式で与えられる。

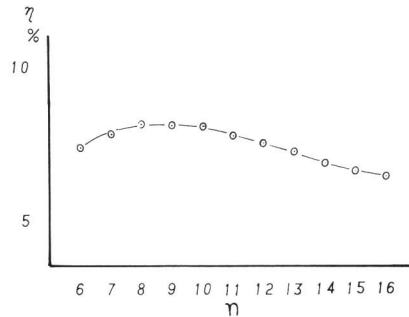
$$N = 9.8QH\eta \text{ [kW]} \quad (4)$$

但し上式は貯水池等における静水の場合である。そこで、流速  $v_0$  で流れる流量  $Q$  の場合の出力として、

$$N = Q(\frac{1}{2}v_0^2 + 9.8H)\eta \text{ [kW]} \quad (5)$$

を用いた。

(3) 式と (5) 式から水車効率  $\eta$  を求め第 2 表第 2 欄に記載した。また杵数の変化にもなる効率の変化を第 6 図に示した。この結果から杵数 8~10 本において最も効率が良いことがわかる。この効率は他の水車場で実測した効率 20~30% と比較するとき、低い値であり、これらの原因について今後検討を加えたい。



第 6 図 杵数対水車効率特性

## 考 察

測定 1 の結果から、角速度が杵数の 2 乗に比例していることが明らかとなった。測定 2 の加速時の角加速度が一様でない原因として、水輪の回転速度と流量が関係していると考えられる。減速時における加速度曲線の変化は、水輪軸、杵軸等の形状および軸受がスリーブ軸受であることが大きな原因と考えられる。測定 3 から杵数 8~10 本に杵出力の最大値があり、また、水車効率はわずかに約 8% である。

以上、水車出力に関する基礎的調査により、一応の結果を得ることができた。今回の結果を参考に、今後新たな調査項目を加え、検討したい。

## Summary

In investigating the actual state of watermills, the measurement of their motive power is important.

The Prony brake method is a widely known technique for measuring the watermill's motive power, but this method is unsuitable for actual state investigations, for the reasons that watermills are varied in type, that some appurtenances have to be fitted to the watermill under investigation, and that the operation of the watermill must be stopped for many hours during the measurement.

In order to find out an appropriate method for actual state investigations, we performed an experimental measurement of a watermill in Imaichi City, Tochigi Prefecture. By the use of simple apparatuses, such as the current meter, the transit, the scale, the stop watch and the 8 mm movie camera, we calculated the watermill's

period, angular velocity, angular acceleration, power and efficiency.

The result of the measurement by this method has revealed that, as far as the investigated watermill is concerned, the relation between the number of pounders and the angular velocity can be expressed by a quadratic curve, that the maximum efficiency, about 8.1%, is found in relation to the change in number of pounders, and that watermill power is 0.87 kW.

