

コアンダ効果を利用した取水設備の性能確認実験

中小水力発電への適用に向けた基礎検討

橋本 貴之^{*1}・小俣 哲平^{*1}・熊坂 理紗^{*2}・インレスウェ^{*2}

Keywords : hydroelectric power generation, Coanda effect, water intake, dust removal, hydraulic experiment

水力発電, コアンダ効果, 取水, 除塵, 水理実験

1. はじめに

我が国では、2050 年カーボンニュートラルに向けて再生可能エネルギーの導入を促進しており、水力発電に対する期待も高まっている。一般的に水力発電は、温室効果ガスの排出量が少なく、太陽光発電などとは異なり昼夜を問わずに安定して発電できるため、設備利用率は高く、エネルギー自給率の向上が見込める。さらに中小水力発電の場合には、一定量以上の水流があれば設置可能であるため、郊外河川や農業用水だけでなく、都市部の工場・ビル・下水処理施設等の排水からも電気を生み出すことができる。環境省による「再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査」から、設備容量 3 万 kW 未満の中小水力発電を対象としたポテンシャル等試算結果によると、中小水力発電の導入ポテンシャルは河川部で 1,398 万 kW、農業用水路で 30 万 kW と試算されている¹⁾。しかし、中小水力発電設備では、河川や水路を流下する流木・塵芥（落ち葉や砂など）によってスクリーンが目詰まりすることから、除塵機等の設備が必須となる。従来の除塵設備には、除塵機（レーキ形やネット形など）だけでなく、除塵したものを運搬する設備（ベルトコンベヤなど）や、一時的に貯留する設備（タンクなど）が必要となる。さらに、除塵機の運転継続中には電力が必要であり、除塵した堆積物の処理作業や設備自体のメンテナンスなどの維持管理費用がかかる。

そこで本研究では、上流からの水を流木・塵芥と分離して取水し、スクリーン上の堆積物を流下水により下流へ流す自浄機能を持つコアンダ・スクリーンを、中小水力発電の取水設備に適用するために、水理実験^{2), 3)}を実施して取水および除塵に係わる性能を確認した。

2. コアンダ・スクリーンについて

2.1 コアンダ効果

一般に、水の流れは水の粘性によって周囲の空気を巻き込んで流れているため、湾曲した壁などの構造物近傍では水と構造物の間に負圧が生じる。そのため、水の流れは構造物に引き寄せられ、表面に沿った流れになる。この現象を「コアンダ効果」と呼ぶ。

2.2 コアンダ・スクリーン

コアンダ・スクリーンとは、2.1 に示すコアンダ効果を利用したもので、1980 年代にアメリカで考案され、1995 年頃から米国合衆国開拓局（United States Bureau of Reclamation ; USBR）によってコアンダ・スクリーンの室内実験が行われており、詳細に検討されている^{4), 5)}。

たとえば、河道内における既存の堰の下流側に設置した取水設備（図-1）に、弧状の本スクリーンを取り付け、上流からの水をスクリーンに沿った流れとし、落ち葉や砂などを分離して水を取り込む。また、スクリーン表面の流れや増水時のオーバーフローにより、

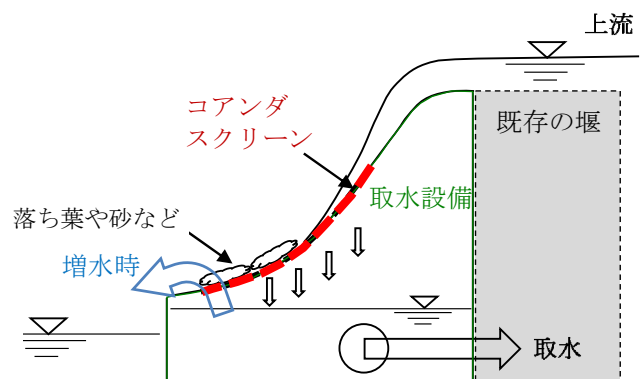
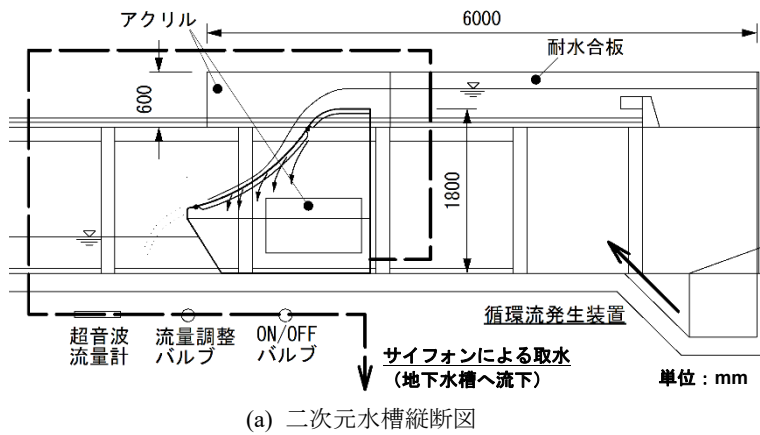


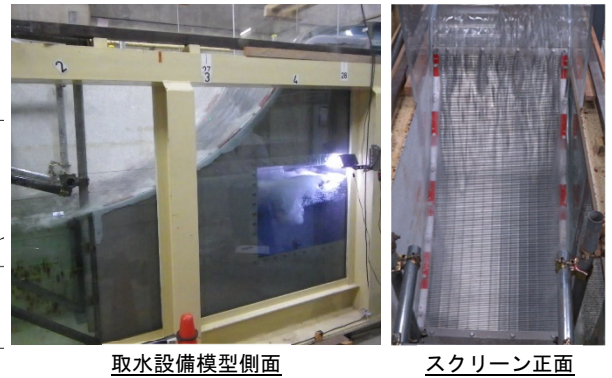
図-1 コアンダ・スクリーンを用いた取水設備
Fig.1 Water intake system using the Coanda screen

*1 技術センター 社会基盤技術研究部 水理研究室

*2 大成ロテック（株）



(a) 二次元水槽縦断面図



取水設備模型側面

スクリーン正面

(b) 取水設備模型への水の流下状況

図-2 二次元水槽における実験装置の配置状況

Fig.2 Layout of experimental equipment in the two-dimensional water channel

スクリーン上に残る落ち葉や砂などの堆積物を下流に流す自浄機能を有する。

コアンダ・スクリーンの取水方式については、バースクリーン方式のうち底部取水方式（チロル型式）に分類される。しかし、スクリーンバーの設置方向は、基本的な底部取水方式（チロル型式）とは異なり、水の流れに対して直角方向となる。ここで、コアンダ・スクリーンに使用するのは、逆三角形の断面をしたワイヤーを等間隔に並べてスリットを形成したウェッジワイヤーである。逆三角形のワイヤー断面のため水切れがよく、目詰まりが少なく、強靱で精度の高い特徴を有する多目的スクリーンとして用いられる。

一般的な取水方式（堰堤直接取水方式等）と比べた場合のコアンダ・スクリーンのメリットとデメリット⁹⁾を、以下に示す。

【メリット】

- ・水流により流木・塵芥が流されるため、維持管理に係る手間と費用が抑えられる。
- ・塵芥除去のための追加スクリーンが不要となる。
- ・水流による除塵機能のため、電源が不要となる。
- ・ワイヤー間隔が狭いため、魚類への影響が小さい。

【デメリット】

- ・ワイヤーの材料や加工の費用が比較的高価である。
- ・転石等による変形で機能低下する可能性がある。

3. 二次元水槽実験

3.1 実験概要

二次元水槽での実験では、コアンダ・スクリーンを取り付けた取水設備に対し、ウェッジワイヤーの形状や間隔、流下する落ち葉による取水量への影響をそれぞれ確認した。以降に詳細を示す。

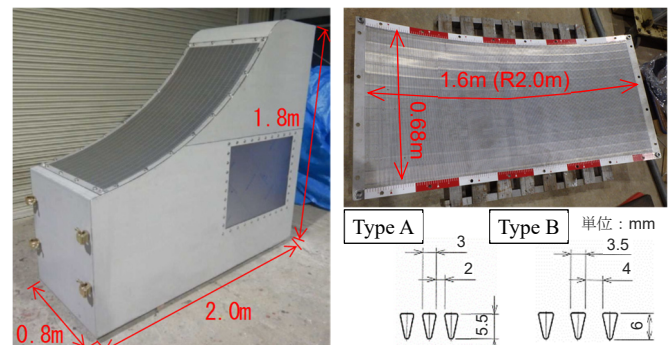


写真-1 取水設備模型とウェッジワイヤーの詳細

Photo.1 Models of water intake equipment and wedge wires

3.2 実験方法

3.2.1 実験装置

本実験では、想定縮尺を1/1の実機スケールとした。図-2に実験装置の配置状況を示す。図に示すように、二次元水槽（長さ47.0×幅0.8×高さ1.6m）内に、コアンダ・スクリーンを取り付けた取水設備の模型を設置した。上流からの水の流入については、二次元水槽に付帯の循環流発生装置を用いて模型に流下した。スクリーンを通過した水の取水については、模型背面下部にある配管を通じてサイフォンにより地下水槽に流下させた。なお、上流側流量は循環流発生装置に付帯する電磁流量計、取水量は超音波流量計でそれぞれ測定した。

3.2.2 実験模型

本実験では、写真-1の通り、取水設備（長さ2.0×幅0.8×高さ1.8m）にコアンダ・スクリーン（長さ1.6×幅0.68m）を取り付けた模型を使用した。

本スクリーンのウェッジワイヤーは2種類を用い、ワイヤー幅3×高さ5.5×間隔2mm（間隙率40%）のType Aと、ワイヤー幅3.5×高さ6×間隔4mm（間隙率53%）のType Bを対象とした。

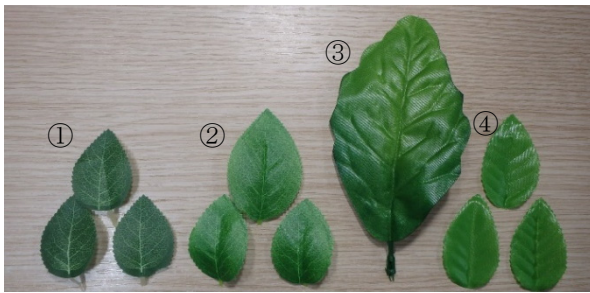


写真-2 実験で使した人工葉
Photo.2 Artificial leaves used in the experiment

表-1 人工葉の諸元
Table 1 Parameters of artificial leaf

人工葉	葉部分の寸法 [mm]		プラスチック製の葉脈の有無
	縦	横	
①	46	33	有り
②	50	35	有り
	64	42	
③	136	81	有り
④	57	33	無し

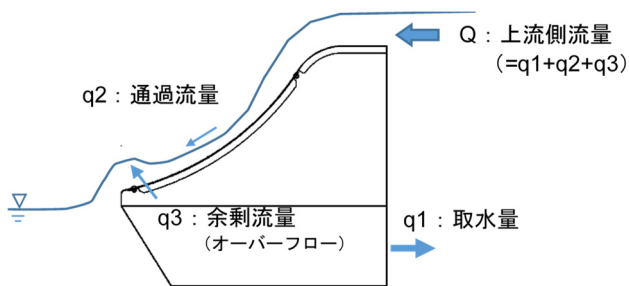


図-3 本実験における各流量の定義
Fig.3 Definition of each flow rate in the experiment

本実験で流下させる落ち葉は、写真-2 および表-1 に示すように葉部分の寸法が幅 5～14cm、長さ 3～8cm の 4 種類を混合した人工葉と、実際の落ち葉を使用した。なお、人工葉のうち①～③については、プラスチック製の葉脈が模倣されたものである。

3.2.3 実験ケース

本実験では、図-3 に示すように上流側流量 Q は、取水量 q_1 とスクリーン表面上を流れる通過流量 q_2 、設定取水量を超えてオーバーフローする余剰流量 q_3 を足し合わせたものに一致する ($Q=q_1+q_2+q_3$)。

本実験の検討ケースを以下に示す。

- (1) ウェッジワイヤーによる取水性能を確認するため上流側流量 Q を変化させ、取水量 q_1 を測定した。ウェッジワイヤーの Type A は間隔が 2mm (間隙率 40%)、Type B は間隔が 4mm (間隙率 53%) である。
- (2) スクリーンの範囲の中で取水性能に影響のある範囲を特定するため、スクリーンの延長方向を部分的

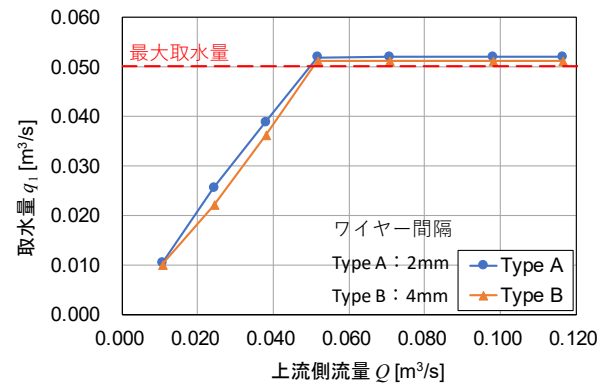


図-4 ウェッジワイヤーの形状による取水量の変化
Fig.4 Variation of water intake amount by wedge wire shape

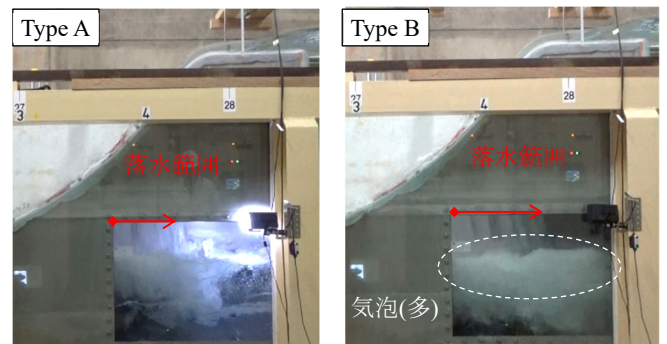


写真-3 スクリーンからの落水範囲
Photo.3 Water fall range from screen

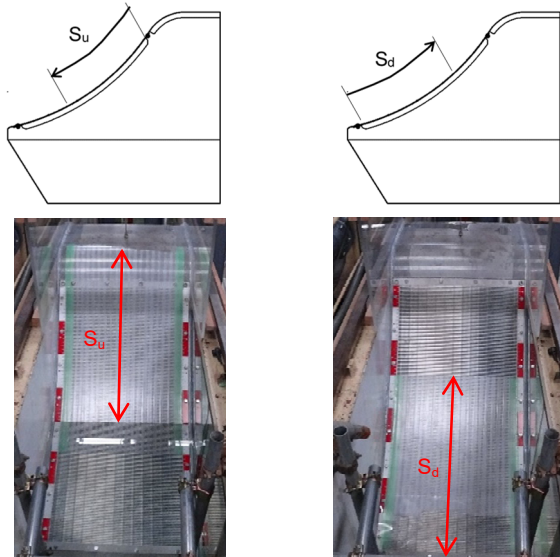
に閉塞し、取水量 $q_1=0.05\text{m}^3/\text{s}$ を一定とした場合での上流側流量 Q を測定した。

- (3) 上流側流量 Q を一定とし、人工葉や実際の落ち葉を流下させ、その前後で取水量 q_1 を測定することで、落ち葉が取水性能に影響するか否かを確認した。なお、ウェッジワイヤーは Type B (ワイヤー間隔 4mm ; 間隙率 53%)、スクリーン下側の閉塞距離を $S_d=0.50\text{m}$ とし、目標取水量を $q_1=0.03\text{m}^3/\text{s}$ とした。

3.3 実験結果

3.3.1 ウェッジワイヤーの形状による取水量の比較

ウェッジワイヤーの形状 (Type A vs. Type B ; 写真-1) による取水量の変化を図-4 に示す。この結果から、ウェッジワイヤーの形状によらず、上流側流量に対する取水量はほぼ一致しているため、ワイヤー間隔が 2mm と 4mm では取水性能がほとんど変わらないことが確認された。ただし、写真-3 に示すスクリーンからの落水状況から、ワイヤーの間隔が大きいほど落水の範囲が上流側に移動し、水の落下高さが高くなるために気泡が多くなることが分かった。今回の二次元水槽の実験装置のように、サイフォンを利用した取水配管が落水範囲にある場合には、気泡が入り込み取水ができなくなる可能性があるため注意が必要である。



(a) 上端からの閉塞距離 S_u (b) 下端からの閉塞距離 S_d

写真-4 スクリーンの閉塞状況
Photo.4 Screen blockage condition

3.3.2 スクリーン内の取水影響範囲の特定

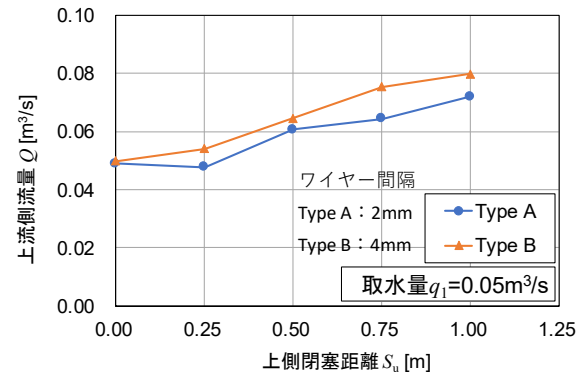
取水性能に影響のあるスクリーンの範囲を特定するため、スクリーンの上端もしくは下端からテープとアクリルシートを貼り付けることで閉塞させ（写真-4）、取水量 $q_1=0.05\text{m}^3/\text{s}$ に対する上流側流量 Q を確認した。なお、スクリーンの上端から閉塞した距離を S_u 、下端から閉塞した距離を S_d とした。

上側閉塞距離 S_u と下側閉塞距離 S_d に対する上流側流量 Q の結果を図-5 にそれぞれ示す。これらの結果では、ワイヤーメッシュの Type A と Type B とともに、 $S_u \leq 0.25\text{m}$ および $S_d \leq 0.50\text{m}$ の範囲で、閉塞していない ($S_u=S_d=0\text{m}$) 結果に対し上流側流量 Q の変化がほとんど見られない。したがって、 $S_u \leq 0.25\text{m}$ と $S_d \leq 0.50\text{m}$ のスクリーン範囲は、取水性能に対する影響が小さい範囲と考えられる。このことから、今回の取水設備模型の延長を約 0.50m は小さくできる可能性が示唆された。

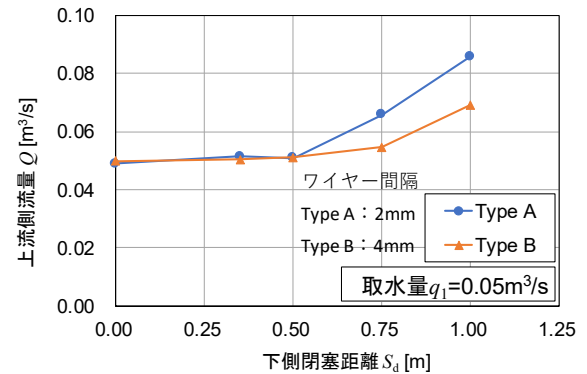
3.3.3 落ち葉による取水量への影響

流下した落ち葉による取水量への影響については、上流側流量 Q および取水量 q_1 が安定し、各流量の測定開始 1 分後に人工葉もしくは実物葉を流下したときの各流量の変化によって確認した。

落ち葉（人工葉、実物葉）の流下前後における取水量の変化を図-6 に示す。これらの結果から、人工葉と実物葉ともに流下前後で取水量にほとんど変化がないことが確認された。そのため、落ち葉によるウェッジワイヤーの目詰まりが原因で取水性能が低下するなどの影響はほとんど見られず、十分な除塵機能を有していると考えられる。

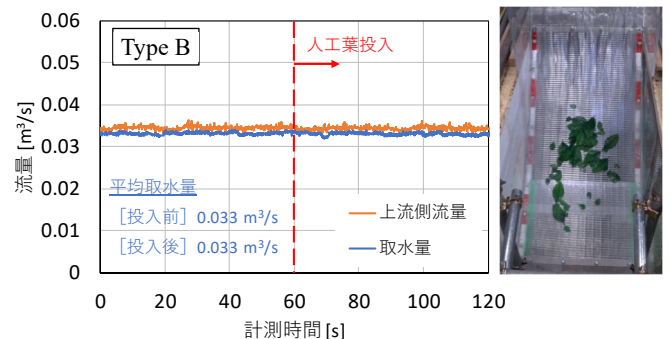


(a) スクリーン上側の閉塞

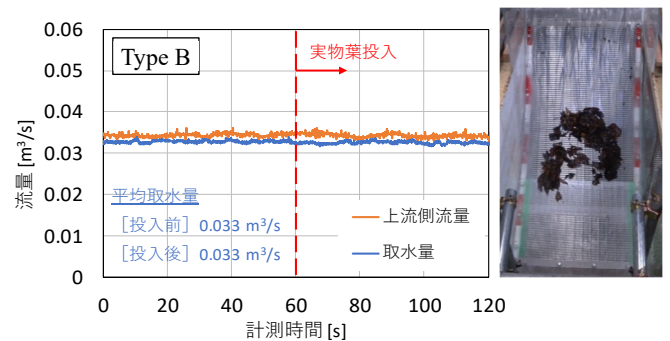


(b) スクリーン下側の閉塞

図-5 スクリーンの閉塞距離に対する上流側流量
Fig.5 Upstream flow rate against screen blockage distance



(a) 人工葉の場合



(b) 実物葉の場合

図-6 落ち葉の流下前後における取水量の変化
Fig.6 Variation of water intake amount before and after leaf flow down

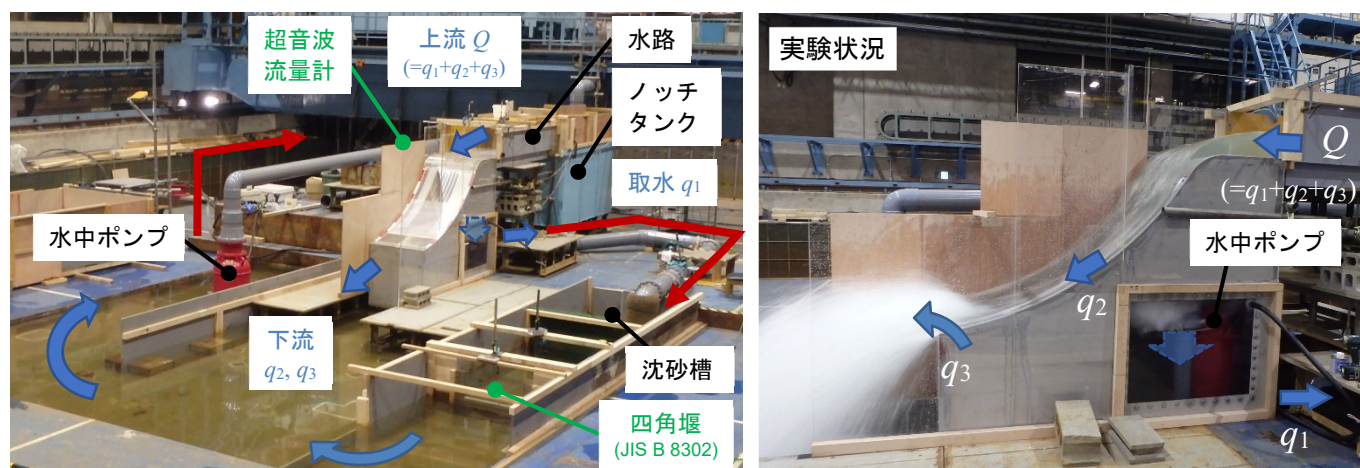


写真-5 平面水槽における実験装置の配置状況

Photo.5 Layout of experimental equipment in the plane water tank

4. 平面水槽実験

4.1 実験概要

平面水槽における実験では、コアンダ・スクリーンを取り付けた取水設備に対して、スクリーンを部分的に閉塞した状態での上流側流量に対する取水量、スクリーンを通過した砂の質量および粒度分布を確認した。以降に詳細を示す。

4.2 実験方法

4.2.1 実験装置

本実験は、二次元水槽実験と同様に想定縮尺を 1/1 の実機スケールとした。写真-5 に実験装置の配置状況を示す。平面水槽（長さ 35.5×幅 17.0×高さ 1.6m）内のピット（一辺 7.0×深さ 0.5m）にコアンダ・スクリーンを取り付けた取水設備の模型を設置した。上流からの水の流入については、水中ポンプでピットの水を吸い上げ、取水設備模型の後方に設置したノッチタンクに送水し、水路を通じて模型上に流下した。スクリーンを通過した水の取水については、取水設備模型内に設置した水中ポンプにより実施した。なお、上流側流量は超音波流量計で測定し、取水量は JIS B 8302 に基づきポイントゲージによる四角堰の水位から流量を算定した。また、スクリーンを通過した砂は、取水設備模型内と沈砂槽の 2 箇所から回収した。

4.2.2 実験模型

本実験では、二次元水槽実験で用いた写真-1 の取水設備模型を使用した。なお、本実験で用いたウェッジワイヤーは 1 種類とし、ワイヤー幅 3×高さ 5.5×間隔 1mm（間隙率 25%）を対象とした。

本実験で使用する砂は、あらかじめ粒径 2mm 以下に粒度調整をして 1 ケース当たり 20kg を流下させた。



図-7 スクリーンの取水範囲の設定

Fig.7 Setting the water intake range of the screen

4.2.3 実験ケース

本実験の検討ケースを以下に示す。

- (1) スクリーンの取水範囲を変化させ、上流側流量 Q に対する取水量 q_1 を測定した。ここで、スクリーンの取水範囲は、図-7 に示すようにテープを使用して、スクリーンの両脇および下流側を塞ぎ、幅を 340, 500, 640mm の 3 ケース、延長を 500, 1000mm の 2 ケースに設定した。上流側流量は $Q=0.015\sim0.140\text{m}^3/\text{s}$ の範囲で変化させ、7 ケースとした。
- (2) 上流側流量 Q を変化させて、スクリーンを通過した砂の質量と粒径分布を測定した。なお、スクリーンの範囲は幅 340×延長 1000mm に固定し、上流側流量は $Q=0.015, 0.060, 0.129\text{m}^3/\text{s}$ の 3 ケースとした。

4.3 実験結果

4.3.1 スクリーンの範囲に対する取水量の確認

スクリーンの範囲ごとの上流側流量 Q に対する取水量 q_1 の結果を図-8 に示す。この結果から、スクリーンの延長が 500 から 1000mm に 2 倍となっても取水量の増加は 1.1~1.6 倍であることから、スクリーン上流側からの取水量が多いことが確認できた。また、本実験条件では、スクリーンの幅が 340 から 680mm になった場合、取水量は概ね 1.5 倍に増加することを確認した。

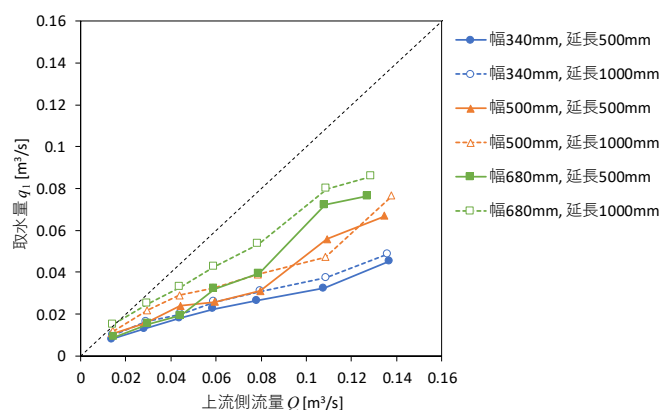


図-8 各取水範囲の上流側流量に対する取水量の変化

Fig.8 Variation of water intake amount with respect to upstream flow rate in each intake range

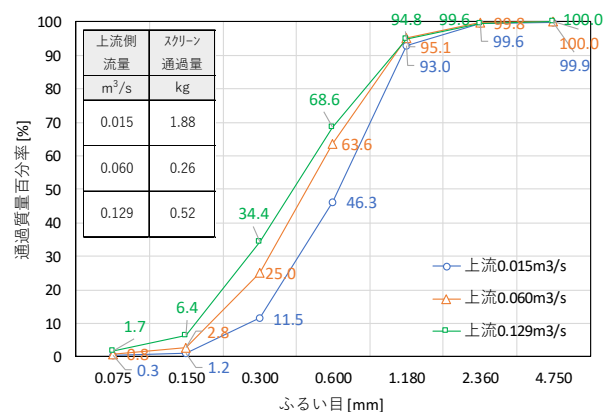


図-9 スクリーンを通じた砂の質量・粒度分布

Fig.9 Mass and grain size distribution of sand passing through the screen

4.3.2 スクリーンを通じた砂の質量・粒径分布

取水設備模型の上流側に設置した水路から、砂を徐々に流下させ、スクリーンを通過した砂を回収して質量と粒度分布を確認した。図-9 に示す結果より、上流側流量が小さいとスクリーンを通過する砂の質量は多くなり、粒径の大きい砂の割合が大きくなることが分かる。また、写真-6 より上流側流量が小さいと、スクリーン下流側の閉塞部に砂が溜まる状態が一時的に見られたが、実験終了時には洗い流されており、取水に支障をきたすような砂の目詰まりは見られなかった。

5. まとめ

本研究では、コアンダ効果を利用した取水設備を中小水力発電に適用するため、水理実験により取水性能・除塵性能を確認した。得られた結果を以下に示す。

(1) 二次元水槽実験

- ・ワイヤー間隔が2mm（間隙率40%）と4mm（間隙率53%）では、コアンダ効果を利用したスクリーンの取水性能に大きな違いは見られなかった。
- ・スクリーンの範囲のうち上端もしくは下端から閉塞させて水理実験を行った結果、今回の取水設備模型の場合にはスクリーンの下端から0.5mの範囲は取水性能に影響が小さいと分かった。
- ・落ち葉として人工葉と実物葉を流した結果、両方ともスクリーンで葉と水が分離して取水ができ、堆積した葉が取水性能を低下させることはなかった。

(2) 平面水槽実験

- ・ワイヤー間隔1mm（間隙率25%）のスクリーンでは、延長が取水量増減に与える影響は小さいことが分かった。このことから、所定の取水性能を確保しつつ、スクリーン延長の短縮も可能であることが示された。

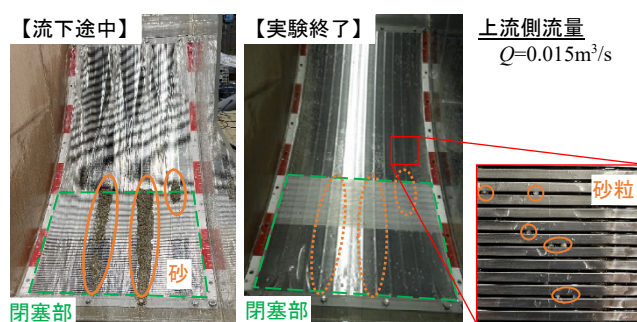


写真-6 砂を流下した後のスクリーンの状態

Photo.6 Condition of the screen after the sand flowed

- ・上流側流量が小さいと通過砂の粒径は大きく、流量が大きいと通過砂の粒径は小さいことを確認した。
- ・流量が少ないケースではスクリーン上に砂の堆積が一時的に見られたが、表面の流れでほとんど流され、砂の流下に対するスクリーンの自浄機能が示された。

参考文献

- 1) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第2版 第8章, pp.11-13, 2014.
- 2) 城本政一, 長山清一郎, 茂森昌幸, 橋本貴之, 織田幸伸：コアンダ効果を利用した取水設備に関する水理検討—中小水力発電への適用性検討—, 令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会, VI-75, 2020.
- 3) 熊坂理紗, インレスウェ, 橋本貴之, 小俣哲平, 織田幸伸：コアンダ効果を利用した取水設備の性能に関する水理実験—中小水力発電への適用検討—, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会, 2021. (投稿中)
- 4) Tony L. Wahl : Hydraulic Testing of Static Self-Cleaning Inclined Screens, The First International Conference on Water Resources Engineering, American Society of Civil Engineers, 1995.
- 5) Tony L. Wahl : New Testing of Coanda-Effect Screen Capacities, HydroVision International, 2013.
- 6) 一般財団法人新エネルギー財団：平成27年度 中小水力開発促進指導事業基礎調査（水力開発技術情報収集調査）報告書, pp.6-5-6-13, 2016.