

二重翼列波力タービンの研究 （仕切り洞長さの影響）

石山 拓也^{*1}, 黒川 由美^{*2}, 奥村 哲也^{*1}, 林 秀千人^{*1}, 濱川洋充^{*3}

CHARACTERISTICS of NEW BIDIRECTIONAL TURBINE for OWC (Influence of Splitter Duct)

Takuya ISHIYAMA^{*1}, Yumi KUROKAWA^{*2}, Tetsuya OKUMURA^{*1}, Hidechito HAYASHI^{*1},
Hiromitsu HAMAKAWA^{*3}

^{*1}Nagasaki, University

1-14 Bunkyo machi, Nagasaki, 852-8521, Japan

^{*2}West Japan Fluid Engineering Laboratory Co.Ltd
339-30, Kuroishi, Kosaza cho, Sasebo, 857-0401, Japan

^{*3}Oita University

700 Dannoharu Oita, 870-1192, Japan

Abstract

We proposed the new type turbine, double rotor turbine, for OWC to improve the performances of starting characteristics and efficiency. The splitter plate of the double rotor turbine is the most important part that divides the flow into Wells or Impulse rotor. It is discussed the influence of the splitter duct length to the performances in numerically. A torque is gradually decreased with the splitter duct shorter, but the variation is small. It is kept the large torque to start up the turbine. The maximum efficiency is a little larger than Impulse turbine, but lower than Wells turbine. The efficiency becomes maximum at 0.5 length rate. The work rate of Wells rotor is large at small splitter duct, because of the large flow rate to the Wells rotor. The variation of the efficiency with the flow rate is almost same to the duct length. The starting characteristics is improved from the wells turbine at all duct length. At long splitter duct, it is remarkable the flow into the wells rotor wraps around the edge of splitter duct. The flow rate of wells rotor is smaller than impulse turbine.

Key words : OWC Turbine, Wells Turbine, Impulse Turbine, Double Rotor, Splitter Duct Length

1. 緒 言

振動水柱型波力発電に使用されるタービンは主にウェルズ型と衝動型の二種類がある。ウェルズ型の特徴は、高速回転時に高効率で出力が大きいが、流量の変化によって性能が左右されやすく、低速では翼の失速によって停止したり起動しない欠点がある。また、その欠点を改善すべく様々な研究がなされている(高尾他, 2012)。衝動タービンはウェルスタービンに比べ大きなトルクが発揮され起動特性と低速回転時に最高効率が得られる。しかし、最高効率が低く、低速回転のため発電機との相性が良くない(瀬戸口他, 1999)。

これらのことから、ウェルズタービンの低速時での性能改善のため、衝動タービンを起動用ブースタータービンとして用いる試みもなされているが(高尾他, 2016)。メカニズムが複雑であるため、システム構築が難しく、性能改善や起動性に関してはあまり実用的でない。

著者らはウェルズタービンと衝動タービンを組み合わせ、一つのタービンとした簡単なメカニズムで、起動性と高回転時の効率を考慮した二重翼列波力タービンを提案している。二重翼列波力タービンでは、各タービンに

原稿受付 2019年8月9日

^{*1} 長崎大学 (〒852-8521 長崎市文教町1-14)

^{*2} 西日本流体技研株式会社 (〒857-0401 佐世保市小佐々町黒石339-30)

^{*3} 大分大学 (〒870-1192 大分市大字旦野原700番地)

E-mail of corresponding author: hidechito@nagasaki-u.ac.jp

流入する流量を調節するために仕切り洞を設けている。この仕切り洞は、それぞれのタービンの最高効率の作動状況が得られるように流量及び流速の配分を考慮して設計するが(吉田他 2016)。仕切り洞まわりの流れの様子が複雑となることが予想され想定通りの性能が得られるか明確ではない。そこで本研究では、二重翼列タービンの仕切り洞長さを変化させることによって、それぞれのタービンの流動様相の変化を把握し、二重翼列波力タービンの性能への影響をシミュレーションにより調べた。

2. 二重翼列波力タービン形状と計算条件

2・1 二重翼列波力タービンと仕切り洞の形状

図 1 に、二重翼列波力タービンの概要を示す。ウェルズタービンの内側に衝動タービンを組み合わせた構造となっている。それぞれタービン性能の良い羽根形状をもとに設計した。詳細は文献(吉田他 2016)による。タービン外径 300mm、ハブ径 140mm である。高速向きのウェルズロータ部が羽根車の外側に設置され、低速向きの衝動ロータ部が内側に設置される。ハブ/ケーシング比はどちらも 0.7 とし、ウェルズロータ内径が 210mm、両ロータの仕切りに厚さ 5mm のリングを設けている。仕切り洞は、ウェルズロータ側と衝動ロータ側の流れを分けるとともに、それぞれのロータへの流量の調整を行っている。オリジナル形状では、それぞれのタービンが同時に最高効率を示す流量係数となるように、仕切り洞入口断面積を配分して全体の流量バランスを取る幾何形状で、仕切り洞入口の直径が 280mm、長さ 253mm である。仕切り洞は、入口からそれぞれのロータ断面へ断面積が緩やかに変化する形状となっている。本研究では、図 1(b)に示すようにオリジナルより仕切り洞長さ(直径)を小さくして、ウェルズと衝動への流入断面積の割合を変化させた。オリジナルの仕切り洞長さ 253mm に対する比として 1, 0.75, 0.5, 0.25 倍の四つの長さ割合に変化させた。その時の仕切り洞の直径はそれぞれ $\phi 280(1.0)$, 276(0.99), 246(0.88), 216(0.77)mm である。

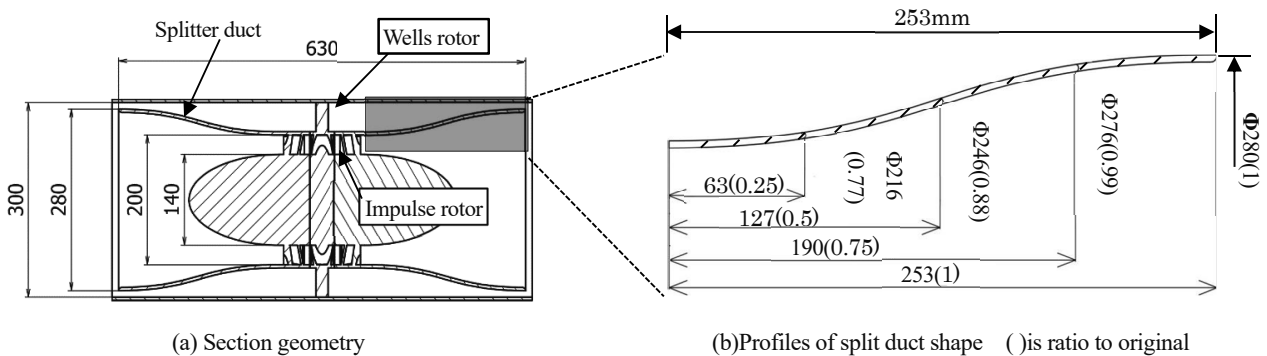


Fig.1 Schematics of Double rotor turbine

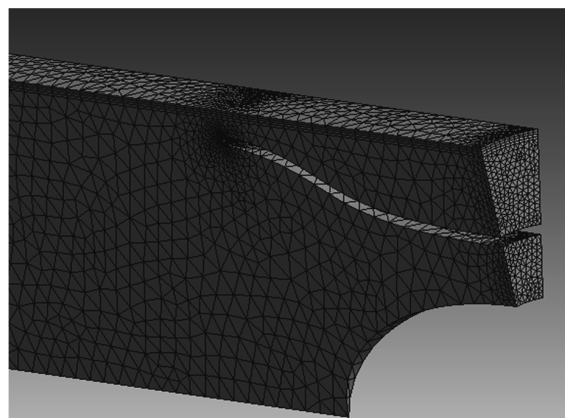


Fig.2 Mesh geometry around splitter

2・2 シミュレーション条件

ウェルズタービン、衝動タービンのそれぞれ1ピッチ分を取り出して行った。上流及び下流の領域は十分長く全長が4000mmである。翼の回転部分はタービン羽根車前後300mmと長く取り、回転領域と静止領域の間のインターフェイスはStageを設定した。回転領域のケーシングは静止境界を設定している。入口境界に流速15[m/s]一定を設定し、各流量係数に応じて回転数を変化させた。下流境界には大気圧を設定した。図2に長さ比0.75の場合の場合の仕切り洞周りのメッシュの状況を示す。仕切り洞入口の流れがウェルズ部と衝動部に分かれる所で分割を細かくしている。格子は非構造格子で、メッシュ数はいずれの場合も上流及び下流に約8万、仕切り洞部分は約4万となっている。仕切り洞部のメッシュについては、メッシュ数およびインフレーションによる影響を調べ、それらの性能への大きな影響へがないことを確認している。また全体では約50万要素である。乱流モデルはSSTを使用した。

3. 結果及び考察

3.1 性能特性

図3は各仕切り洞長さにおける、流量係数と効率の関係を示している。流量係数と効率は次式により定義される。なお、図中には、ウェルズタービン単体と衝動タービン単体の効率も示している。

$$\phi = \frac{V}{R\omega} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{T\omega}{\Delta PQ} \quad (2)$$

ここで、 V は軸流速度[m/s]、 R は翼先端半径、 ω はタービン回転速度[rad/s]、 T はトルク[Nm]、 ΔP はタービン前後の圧力差[Pa]、 Q は流量[m³/s]である。流量係数が大ききところでは、衝動タービン単体が高い効率を示し、ウェルズタービン単体は翼の失速により、効率はかなり低い。二重翼列タービンはその中間の値を示している。仕切り洞長さが長いほうが若干低い値を示しているが、いずれの場合もほぼ同程度で違いはほとんど見られない。流量係数がおよそ0.5付近までは、流量係数が小さくなるにつれて、次第に効率が上昇している。流量係数が0.3～0.5においては仕切り洞長さによって異なるものの、流量係数の減少によって効率がいったん低下あるいはほぼ一定の傾向を示している。ここでは、衝動側ロータの効率が低下し、ウェルズ側ロータの効率が上昇しているところであり、二重翼列では両者の間で仕事の割合が流量係数によって変化していることを示している。さら

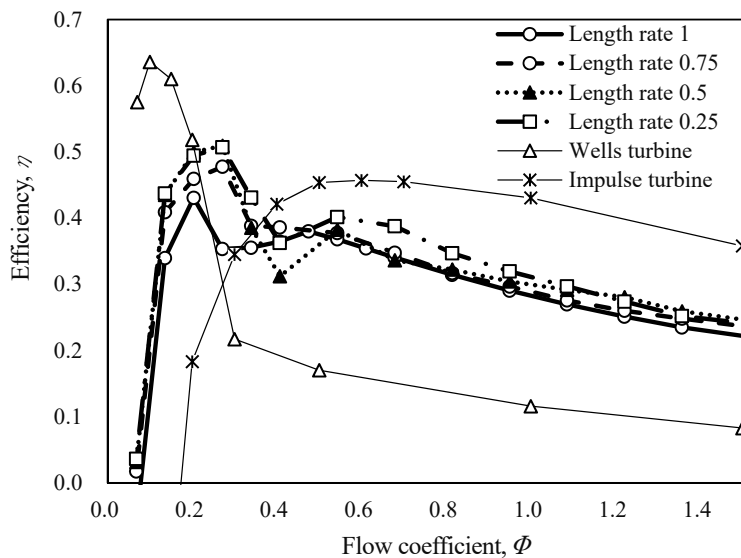


Fig.3 Efficiency for splitter ducts

に, 流量係数が 0.3 より小さくなると, 二重翼列タービンの効率は, ウェルズタービンと同様にいずれの仕切り洞長さの場合も急激に上昇し, 最高効率を示している. 最高効率は, 衝動タービン単体よりも若干高いものの, ウェルズタービン単体よりはだいぶ劣る. これは, 本タービンの各ロータの形状が二重翼列タービンとして最適な形状とはなっていないためである. また, 最高効率を示す流量係数は, ウェルズタービン単体より幾分大きくなっており, 2 重翼列タービンの最高効率点がウェルズロータの最高効率からずれて, 効率の低下し始めている. で作動していることを示している. ただ, 流量係数が 0.2 付近で, 最高効率となっていることはウェルズタービンと同様, 高速型の特徴が保たれているといえる. 仕切り洞長さによる違いは, 短いほうが最高効率は高くなっている. これは, 後述のように仕切り洞が短くなることで, ウェルズと衝動のロータの仕事割合が変化し, 比較的効率が良いウェルズロータの仕事割合が増えてきたためである.

図 4 は各仕切り洞長さにおける流量係数とトルク係数の関係を示している. トルク係数 C_T は次式による.

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho U^2 A R} \quad (3)$$

ただし, U は翼先端周速度, A は流路断面積である. 流量係数の増加とともにいずれの場合もトルク係数は増加している. 流量係数が大きい所では, 仕切り洞長さが 1.0 (オリジナル) の場合は, 衝動単体の場合より若干大きなトルク係数となっている. これは, 二重翼列で仕切り洞が設けられたことにより, 衝動側へ入る断面積が狭められ, 一様にロータへ流入する衝動単体の場合より衝動側の流れが増速されたためである.

仕切り洞の長さ比が 1.0 から 0.75 に短くなると, トルク係数はだいぶ低下している. 一方, それより長さ比が小さい場合は, トルク係数の減少幅は小さい. 後述のように, 仕切り洞長さがオリジナルの場合は, 衝動ロータへ流れる流量がかなり多いのに対して, 長さが短くなると仕切り洞入口部の直径が小さく, ウェルズ側へ流れる流路断面積が大きくなるためトルクの主要部をなす衝動ロータへの流量は著しく減少し, その分ウェルズロータへの流量が増加する. ただ, 仕切り洞長さが 0.25 の時でも, トルク係数はウェルズ単体の時よりだいぶ大きく, 起動特性の良好さを示すものである.

図 5 は各仕切り洞長さにおける流量係数と圧力係数の関係を示している. 圧力係数は次式に定義される.

$$\psi = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (4)$$

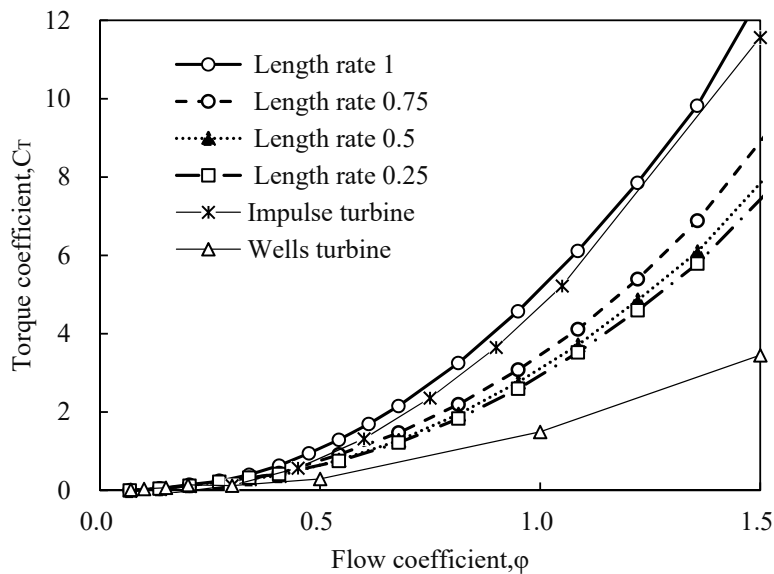


Fig.4 Torque performance for splitter ducts

図中の一点鎖線はウェルズタービン，破線は衝動タービンの圧力係数である．いずれの仕切り洞長さの場合も，流量係数が増加するにつれて圧力係数も増加する．また，仕切り洞が長いほど圧力係数は大きくなっている．仕切り洞が長くなると，後述のように仕切り洞入口部で大きなまわり込み流れが生じ，抵抗が大きくなるためである．特にオリジナルの仕切り洞長さでは，大きな抵抗によりウェルズタービン単体の場合より圧力係数が小さくなっている．反対に仕切り洞が短いと圧力係数は低く抑えられており，エネルギーを有効に活用できている．以上のことから，仕切り洞長さがオリジナルの 50%や 25%においては，図 4 のトルク係数が多少低いものの，図 5 の圧力係数もだいぶ小さく，また仕切り洞長さによる変化も小さいことから，効率の低下が抑えられほぼ同じ性能が得られている．

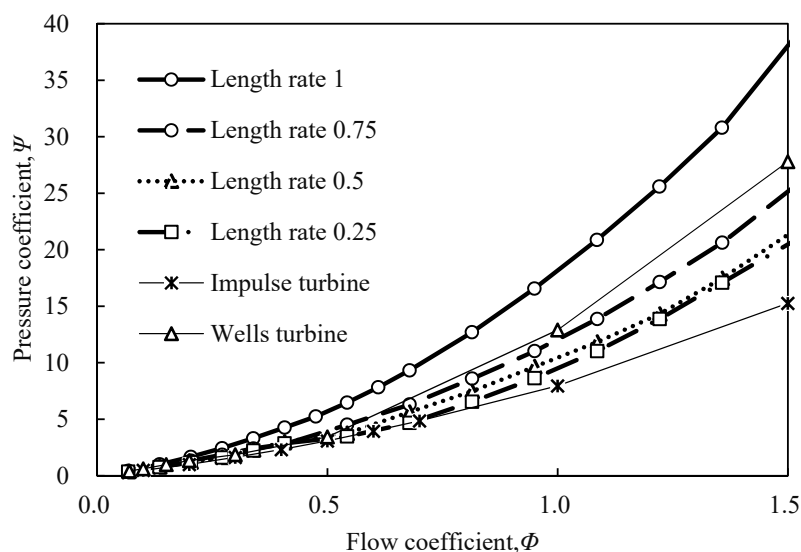


Fig.5 Pressure coefficient

3.2 流動特性

図 6 は衝動側とウェルズ側へそれぞれ流れる流量の比（流量比）の流量係数による変化を示している．本タービンは各羽根車での流路断面積の比（＝(衝動側断面積)/(ウェルズ側断面積)）は 0.44 であるが，いずれの仕切り洞長さの場合も流量比が 0.44 より大きく，面積比以上の流量割合，すなわち衝動ロータ側への多くの流れが発生していることがわかる．また，いずれの仕切り洞長さの場合も，流量係数の減少とともに流量比も小さくなり，衝動側へ流れる流量の割合が流量係数の減少とともに低下していることがわかる．仕切り洞長さ 1.0 の時は，流量係数の大きなところでは流量比が 1.0 より大きく，衝動側へ流れる流量の方がウェルズ側へ流れる流量より大きくなっている．しかし，流量係数 0.4 付近から流れの傾向が変わり，ウェルズ側へ多く流れている．また，長さ比が短くなると，どの流量係数においてもウェルズ側へ流れる流量が多い．流量係数が減少するにつれて，流量比も低下し，仕切り洞長さの比が小さいほど低下割合は小さい．2 つのロータの最高効率点でのマッチング流量比としては 1.3 程度である．これは衝動側へ多くの流量が流れる方が好ましいことを示すものであるが，いずれの場合もウェルズ側へ予想以上の流量が流れている．また，流量係数が小さくなると，ウェルズロータの流れが次第に改善されるために，ウェルズ側の抵抗が小さくなり，さらに流れやすくなっていることが図のような傾向を招いている．

図 7 に最高効率近くの流量係数 0.2 における，仕切り洞付近の流速ベクトル分布を示す．図 7(a)(b)の長さ比 1 と 0.75 では，仕切り洞入口付近で仕切り洞より半径が小さい衝動側からウェルズ側へのまわりこみによる大きな流速ベクトルが観察される．この大きな流速によって仕切り洞入口からウェルズ側への流れはケーシング壁面に偏り，仕切り洞表面では剥離し，スパン方向にかなり偏った流れとなっている．また，衝動側は仕切り洞入口からロータに向かって縮流が起こっており，ロータ入口ではかなり増速されている．この流れが，2 重翼列タ

ービンのトルクの増大を招いている。一方、図 7(c)(d)の長さ比 0.5, 0.25 では流路断面中央からの流れ込みが弱いことがわかる。ただ、図 7(c)は仕切り洞入口が流入方向からずれているため、大きなはく離が発生している。これら短い仕切り洞では、入口でのウェルズ側流路断面積が大きいために、ウェルズ側への流量は仕切り洞が長い場合よりだいぶ多くなっている。また、衝動側のロータ入口では、図 7(a), (b)のような増速があまり起こっていない。

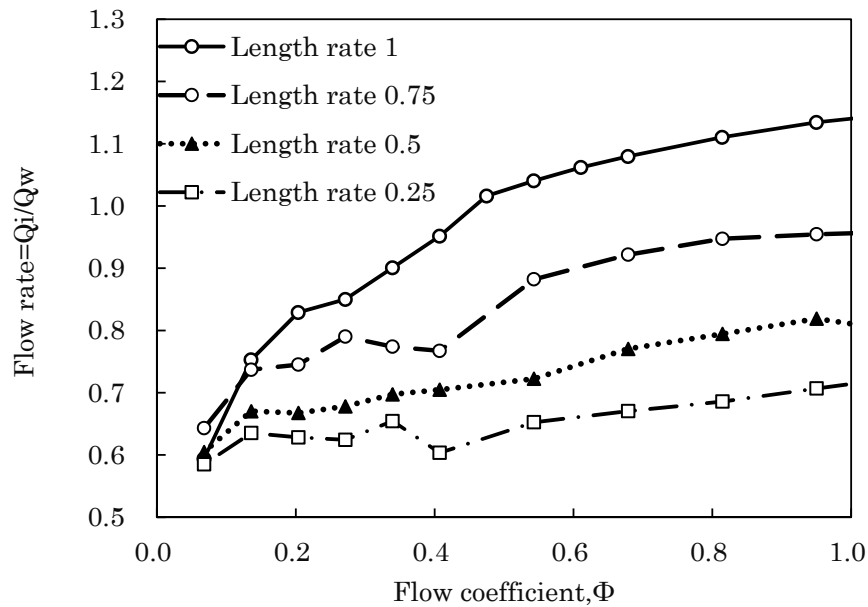


Fig.6 Flow rate of impulse to Wells rotor

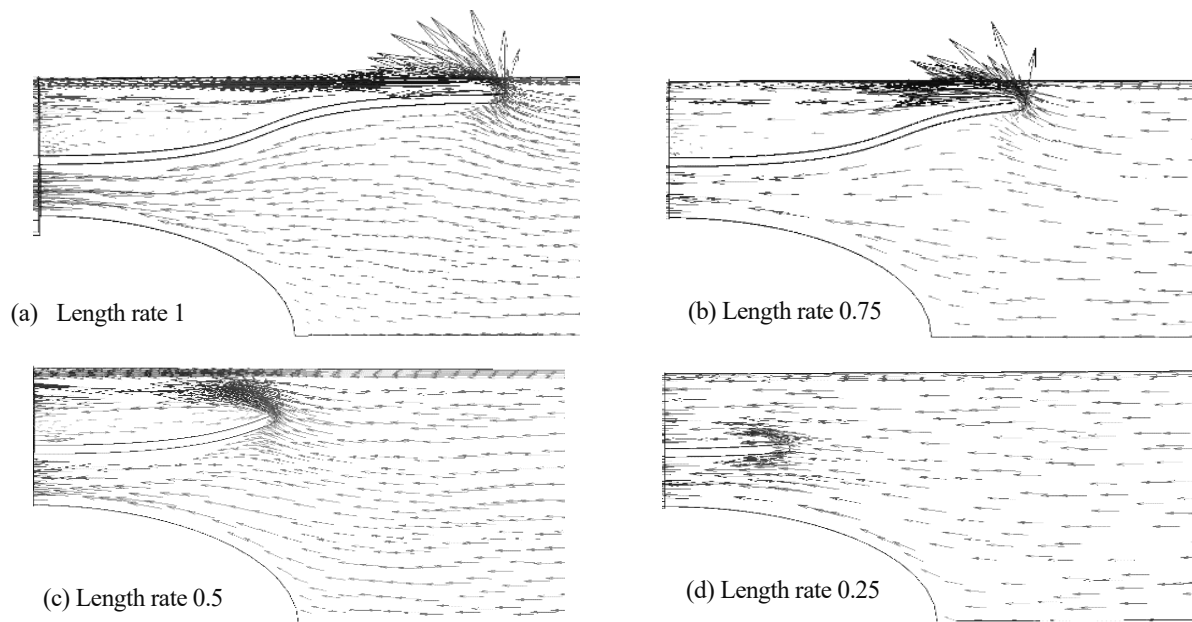


Fig.7 Velocity vectors ($\Phi=0.2$) for each splitter ducts length rate

図8に各仕切り洞長さにおける，二重翼列波力タービンの各タービンの仕事率を示す．仕事率はタービン全体の入力に対するウェルズ，衝動それぞれの部分の仕事率として次式で定義した．ここで， T_w と T_i はウェルズタービンにかかるトルク[Nm]と衝動タービンにかかるトルク[Nm]である．これら仕事率の和が二翼列波力タービン全体の効率となる．

$$\eta'_w = \frac{T_w \cdot \omega}{\Delta PQ} \quad (5)$$

$$\eta'_i = \frac{T_i \cdot \omega}{\Delta PQ} \quad (6)$$

いずれの仕切り洞長さにおいても低流量係数ではウェルズ側が主導的に仕事をし，高流量係数では衝動側が主導的に仕事をしている．仕切り洞が長いオリジナルでは，ほとんどの流量域で衝動側が大きく，ウェルズ側は極低流量域でのみ低い仕事率であるが，主導的な部分を占めている．仕切り洞の長さ比が0.7より短くなると，ウェルズ側の仕事率が低流量域で大きく上昇する．これが，前述のように仕切り洞が短くなるとウェルズ側の流量が増加し仕事が増えることに対応するもので，低流量域での最高効率の上昇を招いている．一方で，衝動側は全流量域で仕事率が低下するため，高流量域における全体効率が仕切り洞長さによってあまり変わらない．さらに，流量係数0.3付近での効率の落ち込みは，衝動ロータの仕事がメインである0.3より大きい流量係数の部分から，ウェルズロータ側に移ることで起こっている．特に仕切り洞が短い0.25と0.5においては，流量係数0.3付近で効率の落ち込みが大きい．

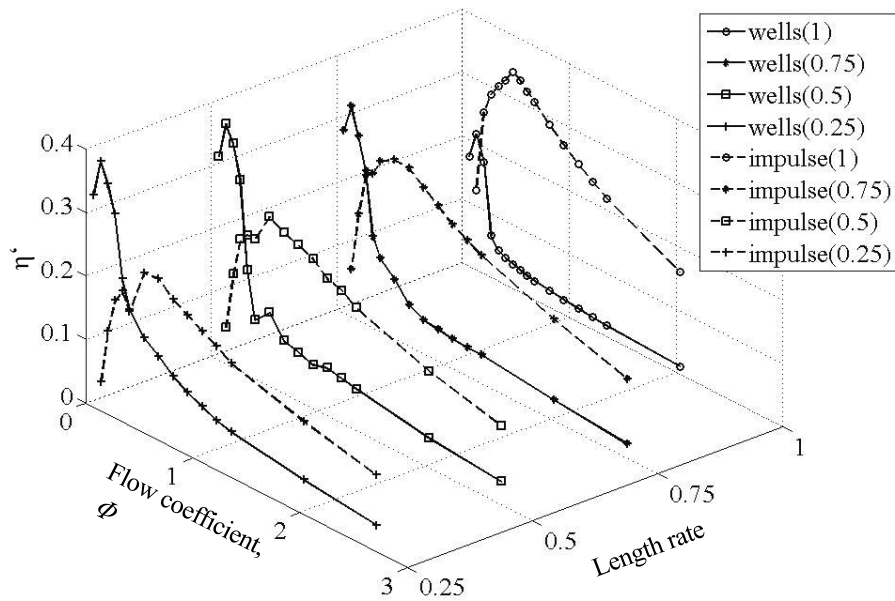


Fig.8 Work rate

4. 結 論

本研究では，提案した二重翼列波力タービンの上流側，下流側に取り付けた仕切り洞長さによる影響を調べ以下の結論を得た．

- (1) トルク係数は仕切り洞長さの比が0.75~0.25では影響は小さく，どの仕切り洞長さでも起動性が良好である．
- (2) 圧力係数は，流量係数全体で見ても仕切り洞長さが短いほうが小さくなっており，エネルギーを有効活用できているといえる．
- (3) 仕切り洞の長さによって，最高効率は多少変化し，長さ比が0.5の時に最も高くなる．また仕切り洞長さが短くなると，最高効率から流量係数が若干大きいところで，効率の落ち込みが見られる．

(4)仕切り洞が短いほうが、流量比は理想とはかけ離れるが、仕切り洞先端の流れ込みの低減や、仕事領域の合わせ込みがうまくいっていることからエネルギーを有効活用できており、広い流量係数範囲で効率が高くなっている。しかし、仕事領域の合わせ込みの影響で、流量係数 0.3 付近の効率の落ち込みは、仕切り洞が短いほうが大きい。

本研究は、佐賀大学海洋エネルギー研究センターとの共同研究により進めている。ここの謝意を表する。

文 献

高尾, 奥原, 瀬戸口, 三次元形状翼を有するウエルズタービン, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集,0915(2012)

瀬戸口, 高尾, 木上, 金子, 井上, 波力発電用衝動タービンに関する研究, 日本機械学会論文集 B 編, 65-629, pp255-261(1999)

高尾, 勝部, 奥原, アラム アシュラフル, 高見, 瀬戸口, ブースターを有するウエルズタービンの性能解析, 日本機械学会第 94 期流体工学部門講演会講演論文集, pp1-4(2016)

吉田光弘,林秀千人,奥村哲也,瀬戸口俊明,二重翼列波力タービンの開発, OTEC,Vol.21,pp59-67(2016)