

OWC 波力発電用タービンの非定常特性試験装置の開発

石山拓也*・中村祐之*・黒川由美**
奥村哲也*・濱川洋充***・林秀千人*

Characteristics of Unsteady Flow Wind Tunnel for OWC Wave Turbine

By

Takuya ISHIYAMA*, Yuji NAKAMURA*, Yumi KUROKAWA**
Tetsuya OKUMURA*, Hiromitsu HAMAKAWA***, Hidechito HAYASHI*

In recent years, the attention has been focused on renewable energy, and the ocean wave energy is expected to be one of the effective renewable energy in Japan. Wave power generation is classified into oscillating water column type, movable bodies type, and overtopping type according to the structural type. In this study, the oscillating water column type is considered that the oscillating air flow produced by the wave drives the bi-directional turbine. We proposed the new turbine for this type. It needs the test equipment to check the performance of the turbine in oscillating flow. There are several types of test equipment for wave turbine research, but they are not sufficient for our turbine test, such as large scale, high cost and complicated mechanics. We have developed a wind tunnel for the oscillating air flow test of turbine that can easily generate an oscillating flow at an arbitrary period. It has a simple structure in which a rotating butterfly valve with variable speed is installed at the exit of the wind tunnel. It is easily generated a short cycle oscillating flow. The period and amplitude of the flow can be changed independently.

Key words : *OWC wave turbine, Unsteady flow, Wind tunnel, Rotating butterfly valve*

1. 緒言

2050年までにCO₂排出ゼロをめざすとの目標から、近年再生可能エネルギーがますます注目されている。世界でも有数の海岸線を誇る我が国では、海洋の波力を利用した波力発電が有効な手法の一つと考えられる。波力発電は太陽光や風力、水力のようなその他の再生可能エネルギー技術と比較して、実用化がまだ十分にはすすめられておらず、実用化へのさらなる研究が望まれている。

波力発電はその構造形式から、振動水柱型、可動物体型、越波型に分類され、本研究で対象とするのは、振動水柱型である⁽¹⁾。振動水柱型は、空気室と呼ばれる空間を持つ構造体、空気タービンおよび発電機で構成される。波による海面の上下動によって、空気室の圧力変動が生じ空気タービンが作動する。タービンが海水に直接接触することがないため、耐久性が高くメンテナンスが容易という特長がある。このような波力発電用タービンは往復動流れにより変動する流れを利用するため、タービンの開発にはそのような変動する流れを再現できる風洞装置が必要である。

波力タービン研究用の風洞としては、実際の波力発電装置と同様に波を起し空気洞を介して空気の往復動を作る装置がある⁽¹⁾。実際の波力発電装置と同様な構造のため、タービン試験を実際とほぼ同様の状況で

令和2年 月 日受理

* 大学院工学研究科機械工学 (Mechanical Engineering)

** 西日本流体技研株式会社 (West Japan Fluid Engineering Laboratory Co.,LTD.)

*** 大分大学理工学部 (Oita Univ. 700 Dannoharu, Oita)

行うことができる。しかし、試験装置が大規模になり、コストがかかること、その規模に応じて干渉等による制限が発生する等の問題がある。また、空気の往復流をピストンの往復動により実現しているものもある⁽²⁾。この場合は、波の発生や空気洞が必要なく、造波装置に比べると小型であるが、構造が複雑であり短周期の往復流が難しい。簡単な構造のものとして、一般のタービン試験風洞と同様の構造であるが、ブロワの回転数を変化させることで作るものがある⁽³⁾。しかし、これはブロワの回転数変化が緩やかであるため、短周期の往復流を実現するのが難しいという問題がある。

そこで著者らは、簡便に任意の周期で往復流を再現できる風洞試験装置を開発した。風洞下流の吐出ダクトに回転運動をするバタフライバルブを設置した簡単な構造であり、比較的短い周期の変動も容易に再現できる。また、周期と振幅を独立して変えることが可能である。

本報では、開発した風洞装置の特性を調べ、その有用性を示した。

2 非定常試験装置の構造

2.1 バタフライバルブによる周期流れの形成

バタフライバルブは360度回転ができるため、そのバルブを一定速度で回転させることで、周期的な脈動が実現される。

図1に非定常流れを作るバタフライバルブ駆動部分を示す。このバルブを風洞吐出部に設置し、吐出する流量を周期変動させる。図に示すようにバタフライバルブ板の位置によって、ダクトの開口断面積が変わるため、バタフライバルブ板を一定回転して、断面積を周期変動させ流量を制御する。断面積の回転角度による変化を Fig.2 に示す。バタフライバルブ板の回転角度 θ における開口断面積は次式で表される。

$$A(\theta) = A_0(1 - \cos\theta) \quad (1)$$

ここで、 $A(\theta)$ は角度 θ における開口断面積である。 A_0 はダクト断面積である。また、同図には、文献(4)による、通常のパタフライバルブの、開口断面積の開き角による変化を示す。両者はよく一致しており、開口断面積は式(1)で簡単に表されることがわかる。波力発電は波の上下動ともなって空気の往復流が発生する。一方、本実験装置では、バルブにより吐出流れの流量を変化させるため、一方向にしか流れず、実際の往復流を再現することはできない。しかしながら、文献(3)にもあるように、流量が一旦ゼロとなることによって、

タービンへの流れは往復流とほぼ同じ状況を再現できると考えている。

2.2 風洞装置と計測方法

Fig.3 に本実験装置を示す。図(a)は風洞全体図である。吸い込み式風洞となっており、ブロワ上流に試験タービンが設置される。タービン下流にはチャンバーがあり、そこで流れが緩められ一様化される。その後ベンチュリ管で流量が計測される。ベンチュリ管下流のブロワの回転数をインバータにて制御することで、往復流の最大流量が設定される。吐出ダクト出口にバタフライバルブを用いた脈動発生装置が設置される。図(b)は脈動発生装置の詳細を示している。バタフライバルブを回転させるために、減速機が付いた直流モータが接続されている。モータ電源電圧を変化させることにより、回転周期を変化させることができる。図(c)は装置の写真である。バタフライバルブ板は、駆動軸にダクト内径より多少小さい円板を取り付け、それにスポンジ状の漏れ止めを付けて一体化している。このバルブ板が回転することによって周期的脈動を作り出している。

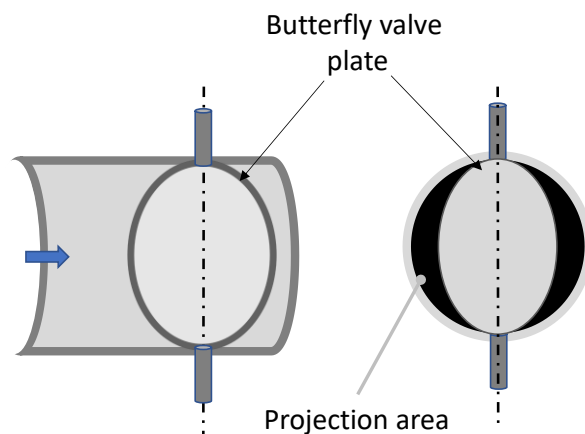


Fig.1 Schematics of periodic flow generator

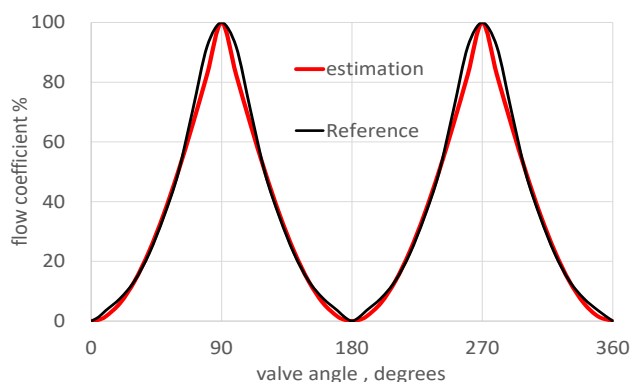
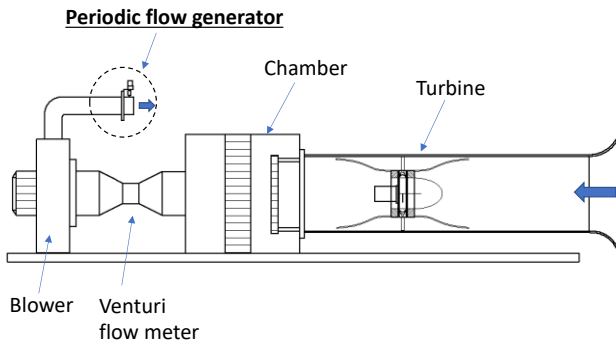
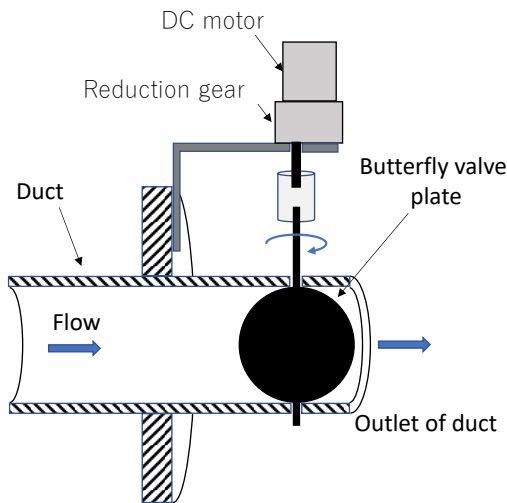


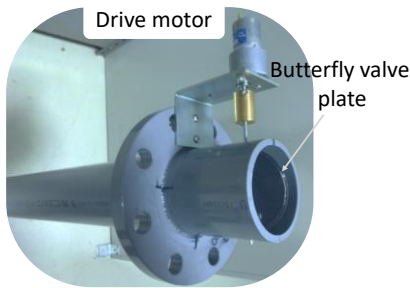
Fig.2 Variation of flow rate with valve angle



(a) Schematics of wind tunnel



(b) Detail of periodic flow generator



(c) Photo of periodic flow generator

Fig.3 Experimental apparatus

3. 実験結果及び考察

3.1 バルブ駆動電源電圧とバルブ回転周期の関係

Fig. 4 は、流れの脈動周期の、バルブ駆動用モータ電源の電圧による変化を示している。駆動用モータは直流モータで、電源電圧を変化させることによって、モータ回転数を変化できる。周期は、電圧の変化にほぼ反比例で変化している。周期は 1 秒弱から 8 秒程度まで変化させることができる。脈動の最大流量は、ブ

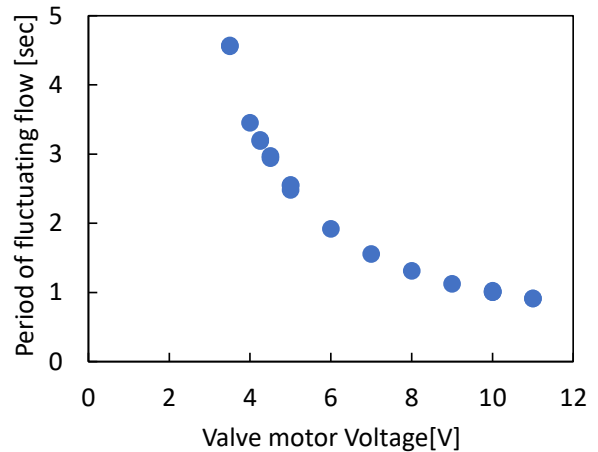


Fig. 4 Relation of period of fluctuating flow with supplied voltage of valve drive motor

ロワの回転数を変えることにより変化させるため、脈動の変動幅はブロワの回転数により、周期はバルブ回転数により、後述のようにそれぞれ独立に変化させることができる。

3.2 圧力の接続チューブ長さによる応答性の変化

流量の計測は、直径 1 mm の静圧孔からビニールチューブで接続された圧力計で計測され、物理量が算出される。通常の定常流れの圧力測定は、計測の応答性は問題とならないが、非定常流れの計測では静圧孔から出入りする空気が脈動流れに対応できず、正しい圧力変動を計測できない恐れがある。Fig.5 は静圧孔から圧力計までの配管チューブ長さを変化させた場合の応答性の違いを見たものである。直径 1 mm の静圧孔から 1/4 インチのチューブが圧力計までつながっている。風洞側のチューブ長さがおよそ 1.7m、またベンチュリ管側では 2.58m とかなり長いチューブと、チューブ長さを風洞側は 0.11m、ベンチュリ管側は 0.08m と短いチューブの場合について、応答性を検討した。図中の赤線は長いチューブの場合である。チューブ長さが短い場合も長い場合も、圧力変動の周期はバルブによる回転周期に対応している。しかし、変動幅はチューブ長さによって大きく異なり、チューブ長さが長くなると、変動の最大流量が多少減少し、最小流量は特に大きくなって、圧力変動の幅が極端に小さくなっている。一方、短いチューブの場合は図中の黒で示すように、最大圧力が大きく、最小圧力もかなり低くなり、変動幅が大きい。今回の圧力孔から圧力計までのチューブ長さは、長さを最も短くしたものである。また、実際の波の周期が数秒以上であることを考慮すると、短いチューブ長さの場合で正しい圧力変動が計測できるも

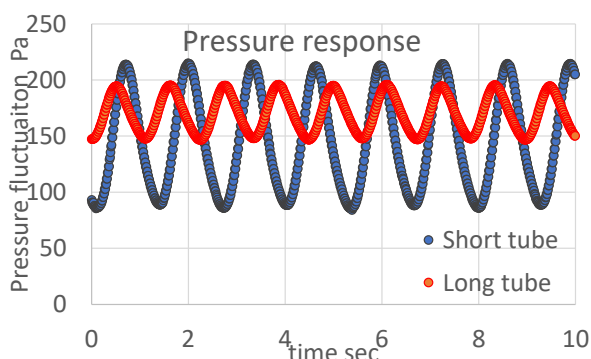
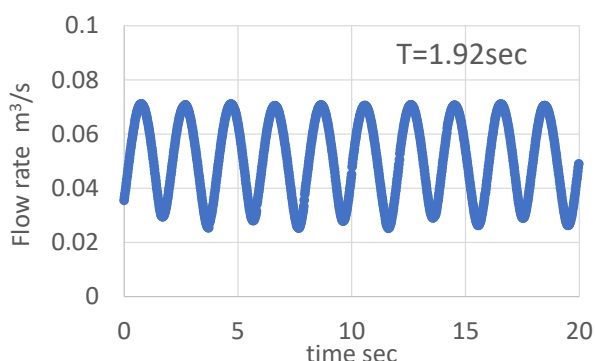
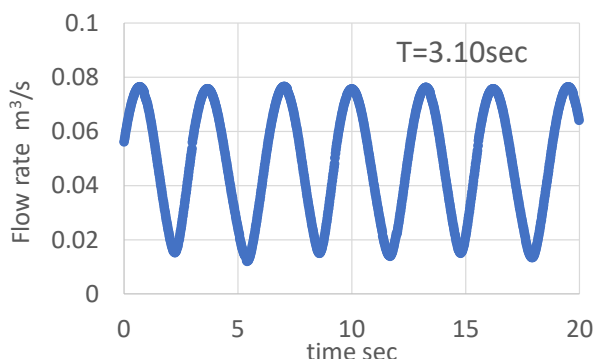


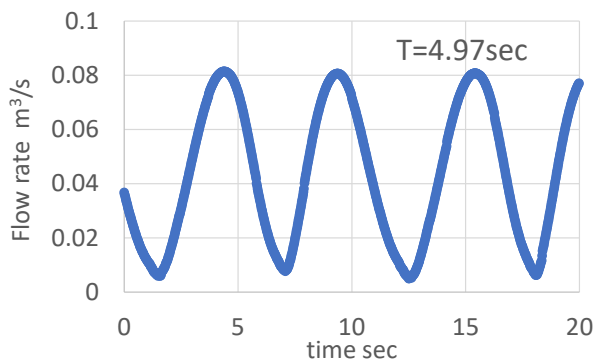
Fig.5 Pressure response with tube length



(a) Short period case T=1.92 sec



(b) Middle period case T=3.1 sec



(c) Long period case T=4.97 sec

Fig.6 Variation of flow rate for valve moving period
Inverter frequency of Blow motor 37Hz

のと想定される。

3.3 圧力及び流量の流量変動周期に対する応答性

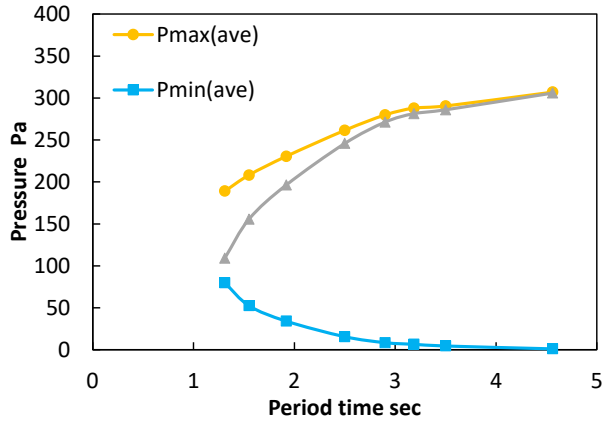
Fig.6 に波長が 1.92 秒から 4.97 秒までの異なる周期の脈動について、流量の時間変動を示している。ブロアの回転数一定、バタフライバルブを最大開いた場合の流量は定常流れにおいてはいずれの場合も同じで $0.081\text{m}^3/\text{s}$ である。図(a)は周期が短い場合である。最大流量が定常流れの流量 $0.081\text{m}^3/\text{s}$ より多少低くなっている。また、最小流量については、ゼロとなるべきものが、0.025 程度になっており、最大、最小流量値が定常の値とは多少異なることがわかる。特に、最大流量での違いが大きく、これは計測した圧力のわずかな誤差が、流量では大きく見積もられるからである。図(b)の $T=3.1$ 秒では最大流量が増加しており、定常流れの流量にだいぶ近くなっている。また最小流量も、ゼロに近づいており実際の流量変動に近づいていることがわかる。図(c)の $T=4.97$ 秒では、さらに振幅が大きくなり、最大流量が定常の場合の流量に達している。最小流量においてもほぼゼロのレベルとなっている。このように、脈動の周期により振幅に変化がみられ、 $T=4.97$ 秒になると、脈動の流量変動がそのまま表れていると考えられる。

Fig. 7 は脈動の圧力および流量の最大流量と最小流量のバルブ開閉周期による変化を示している。ブロアの回転数を一定に保って、バタフライバルブの周期を変化させたものである。図(a)は圧力変動である。脈動周期が長くなるにつれて最大流量が増加している。ただ、増加割合は周期が長くなるにつれて緩やかとなり、 $T=2.5$ 秒以上では定常の流れにおける圧力値に近づいていることがわかる。一方、最小流量は周期が短いときは減少が大きいものの、こちらも $T=2.5$ 秒以上ではほぼゼロの値を示して、定常の値に近づいている。図(b)は流量変動である。最大流量は $T=2.5$ 秒以上では変化がほとんど見られず、ほぼ一定の値となっている。一方、最小流量は最大流量よりも変化が大きく次第にゼロへ近づいている。ただ、周期 $T=4.5$ 秒になっても、最小流量はまだゼロにはなっていない。

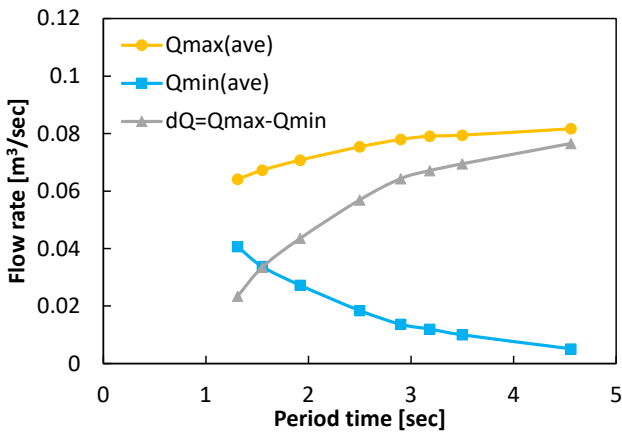
3.4 最大風量に対する応答性への影響

Fig. 8 はブロワ回転数（最大風量）による脈動振幅の影響を示している。図中の赤記号は脈動の最大流量、青色は脈動の最小流量のブロワ回転数による影響である。ブロワの回転数すなわち流量の増加とともにわずかに増加傾向にある。一方で、最大流量はブロワ回転数に比例して増加していることがわかる。ブロワ回転数の増加に比例して、実際の風量は増加していることから、最大流量はブロワ風量に対応しているこ

とがわかる. 一方, 最小流量については, 本来流量ゼロとなるべきであるが, ブロワ回転に対して比例関係から若干ずれている. これらのことから, 最大流量を用いた評価によって, 脈動の風量を評価できると考えられる.



(a) Pressure fluctuation



(b) Flow rate fluctuation

Fig.7 Influences of Maximum and Minimum values of fluctuation with butterfly valve moving period

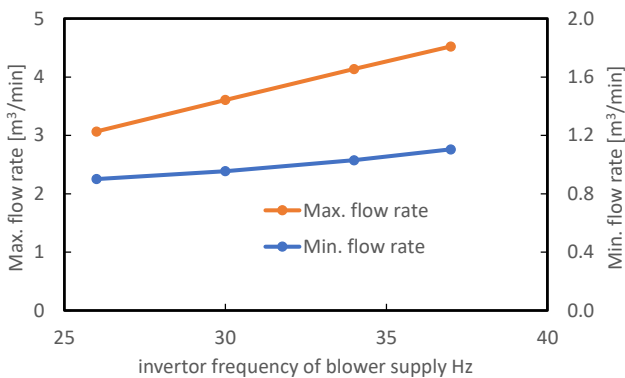


Fig.8 Influences of Maximum and Minimum values of Flow rate fluctuation with blower rotating speed

3.5 ブロワ風量および圧力の校正

前述のように, 風洞の風量・圧力の計測結果について, 圧力計測孔から圧力計までのチューブ内で, 圧力の多少の減衰が考えられる. 比較的長い周期 ($T=2.5$ 秒以上) ではほぼ流量は周期により変化しないものの, わずかに周期が大きくなるにつれて最大流量が増加する傾向を観察できる. 一方, 最小流量については, 実際にはほぼゼロとなっているにもかかわらず, 大きく異なっている. 前述の Fig.2 に示したバタフライバルブの回転角度と開度の関係から, 予想される流量の変化と比べて, 最大流量付近の流量変化がゆるやかになっていることがわかる. これは, 最大風量付近では, 複雑な付着流れの発生により, 投影面積の通りには, 流量が変化していないことを表している.

Fig.9 は, 周期 $T=2.6$ sec について, 文献(1)の波発生装置で形成された流量脈動と本装置の流量測定結果を比較したものである. なお, 文献(1)の脈動は波の上下動により発生したもので, 実際には流量が正と負の往復流れであるが, 本試験装置との比較のために,

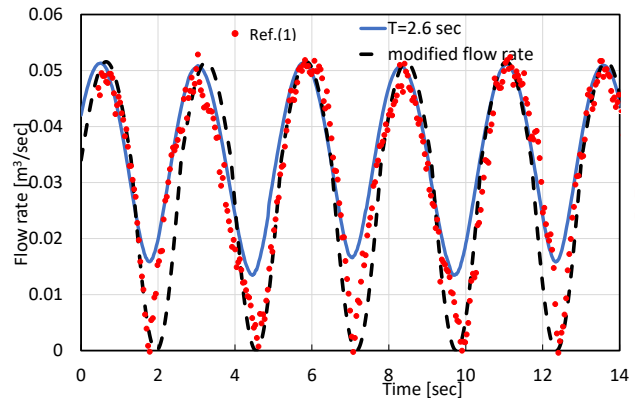


Fig.9 Periodic flow rate variation. Compared with reference (1) with wave generator

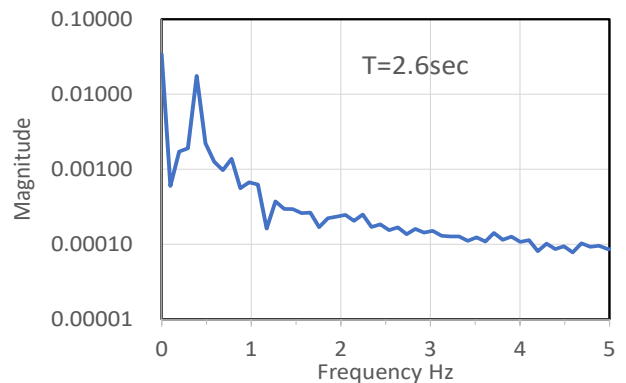


Fig.10 Spectrum distribution of fluctuation flow rate

負の流量については反転させている。図より、流量の最大流量付近の変化の様子は両者でよく合っていることがわかる。一方、最小流量については、本計測方法では、圧力測定の実答性の問題から、実際の流量の最小流量を示していないことが想定されるため、文献(1)とだいぶ異なった変化となっている。以上のことから、本装置により形成させる脈動は、脈動の最大流量については、往復洞による実際の波の流量変化をよく表していると判断できる。一方、最小流量については、前述のようにゼロとなることを想定した分布に修正をすることが妥当である。

Fig.10 は本装置で得られた脈動の時間波形を周波数分析したものである。解析は周期 $T=2.5$ 秒の変動に対するものであるが、図より、その周期に対応する周波数 $f=1/T=0.38\text{Hz}$ に顕著なピークが出ているが、それ以外の成分をほとんど見ることができない。したがって、本装置により発生する波はほぼ単調な正弦波と解釈することができる。

このことから、脈動の最大流量をもとにして、文献(1)のように変動しているものとして、修正式を提案した。ただし、本修正の適応は周期 $T=2.5$ 秒以上のものに限るものとする。波形の修正は、変動の平均値をもとに、それより大きい値は修正せず、それより小さい値について、振幅を平均値にした正弦波に修正を行う。

$$q(t) = \begin{cases} q_{avg} + q_0 \times \sin(\omega t) & \text{at } \sin(\omega t) \geq 0 \\ q_{avg} + q_{avg} \times \sin(\omega t) & \text{at } \sin(\omega t) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 q_{avg} は脈動測定値の平均、 q_0 は脈動の振幅である。Fig. 9 に黒破線で修正した波形を示している。文献の波形をよく表しており、本装置の実際の流量を表していると考えられる。

4. まとめ

OWC 波力発電用タービンの非定常性能試験を行うための風洞装置を製作し、その試験を行い以下の結果を得た。

1. 下流ダクトに取り付けたバタフライバルブを回転させる簡単な方法で、脈動を作る方法を提案し、比較的良好的な脈動を作ることができた。
2. 脈動の周期が $T=2.5$ 秒以上の変動の波については、ほぼ正しい脈動を作ることができた。
3. 脈動の計測に、最大流量の影響はほとんど見られず、流量の振幅と周期を独立して評価することが可能であることが確認された。
4. 脈動の波形について、流量の最小流量に誤差がみ

られるため、実際の脈動に基づいて修正した脈動波形式を提案した。

本研究の一部は、佐賀大学海洋エネルギー研究センター共同利用研究 20B01 によるものである。ここに謝意を表す。

文 献

- (1) 村上, 今井, 永田, 高尾, 瀬戸口, 衝動タービンを有する固定式 OWC 型波力発電装置の高効率化に関する実験的研究, OTEC Vol.20 (2015)pp41~49
- (2) 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 巻 629 号(1999) pp255-261
- (3) 中島, 潮見, 波力発電用タービン翼に関する室内実験—衝動タービン翼のタービン効率特性について—, 港湾技研資料, June 2000, No.958
- (4) <https://www.valveconsul.com/>バルブの流量特性/