

津軽海峡における潮流・海流発電装置の出力効率に関する基礎的研究

A Study on output efficiency of power generating apparatus for ocean and tidal current in Tsugaru Strait

函館工業高等専門学校	○正 員	蛸子翼 (Tsubasa Ebiko)
函館工業高等専門学校	正 員	宮武誠 (Makoto Miyatake)
北海道大学工学研究院	正 員	猿渡亜由未 (Ayumi Saruwatari)

1. はじめに

津軽海峡の潮流流を利用した小規模潮流海流発電装置の実現可能性を探るため、本間ら^{1),2),3)}が津軽海峡狭窄部の汐首岬沿岸部において行ってきた流況観測の結果、現地流況は年間通じ南東方向の一方向に日周期で変動することや、潮流海流エネルギー密度が中層に集中し、冬春期において最大で約 1kW/m^2 強に達するほか、夏期成層期にエネルギー密度が最大より2割程度低下することなどを明らかにしてきた。このような現地における強弱する流れを利用して発電を行う場合、流速が小さい場合においても効率的に発電できる装置が要求される。一方、Mehmoodら⁴⁾は強弱する流れにおいて、小さい流速を漸拡型ディフューザにより高める検討を行っている。著者ら^{5),6),7)}はその研究方針に倣い、現地の流れ特性に適した発電用ディフューザの最適形状について検討を行ってきた。そこで従来の漸拡型ディフューザの出口部につばをつけて更なる増速を図ったつば付き漸拡型ディフューザ形状を考案し、その周辺の流況特性及び通過する流れの増速効果の把握を行った。結果、同ディフューザのつば背後に渦が発生し、漸縮部から背後に渡りジェットが形成され、漸拡型ディフューザ形状のみに比べ、タービンを設置する漸縮部の流速を15%増加することがわかった。加えて、より高効率な増速効果を得るディフューザ形状を把握するため、数種の2次元断面模型を製作し、それらによる定常循環流実験の結果を用いて、高い増速が得られる形状の検討を行い、検証した中で最も高効率となるディフューザ形状を確認した。

本研究は上記の結果に基づき、現地の夏期成層期の流況に最適化を図ったつば付き漸拡型ディフューザにタービンプレードを有した3次元模型を製作し、現地観測から潮流及び海流によって発生しうる速度域を網羅したタービンの回転速度に関する実験を行い、流入流速から回転速度に変換される主流流速に応じた機械的効率特性を把握する。また、その結果から現地適用性について検証し、装置設計に資する基礎的知見を得ることを目的とする。

2. つば付き漸拡型ディフューザによる発電タービンの概要

本研究にて用いるつば付き漸拡型ディフューザの3次元模型概要図を図-1に示す。3次元模型は、現地調査で得られた流速観測結果のうち、潮流海流エネルギー密度が他の期間に比べ2割程度落ち込む夏期成層期での中層流速を対象として、著者ら^{6),7)}が過去に行った模型実験の結

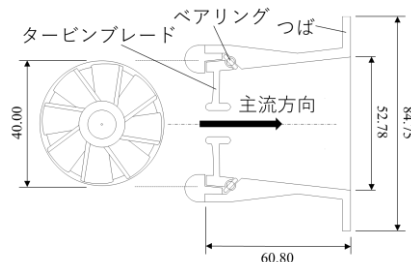


図-1 津軽海峡の夏期成層期の流れに最適化された3次元模型概要図

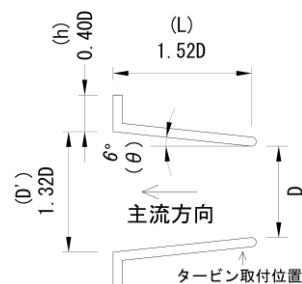


図-2 3次元模型の基になったディフューザ2次元断面形状

果から最適化を図った2次元断面形状(図-2)を考案して設計した。漸縮部に組み込んだタービンプレードは、効率上、大きな負荷が生じる中心回転軸をなくした構造とし、流体軸受ベアリングをタービン外縁とディフューザ内径間に設置することで初動トルクを軽減する機構を採用した。将来的には、実機においてタービンプレード先端部とディフューザ漸縮部外周に磁石とコイルを埋め込むことで、タービン自体が発電機となり、モーターによる電氣的効率を向上させることを想定している。本研究にて用いる3次元模型のタービンプレード内径寸法は4cmとし、模型縮尺は1/25に設定した。なお、今回の研究ではタービンプレードの形状は既往資料から標準的な形状を採用し、本実験の検討対象とはしないものとする。

3. 発電装置の出力効率に関する模型実験

3.1 実験方法

実験は図-3に示す1600cm×40cm×40cmの2次元可傾斜式開水路中に、模型縮尺1/25のつば付き漸拡型ディフューザ3次元模型を設置して行った。水路の傾きは0とし、上流から与える主流流量 Q は、著者ら^{1),2),3)}が過去に実施した現地の流速観測結果からFroude相似律に基づき、3次元模型設置位置における中層流速が表-1の主流流速 u となるよう、下流側の越流堰高 H と合わせて

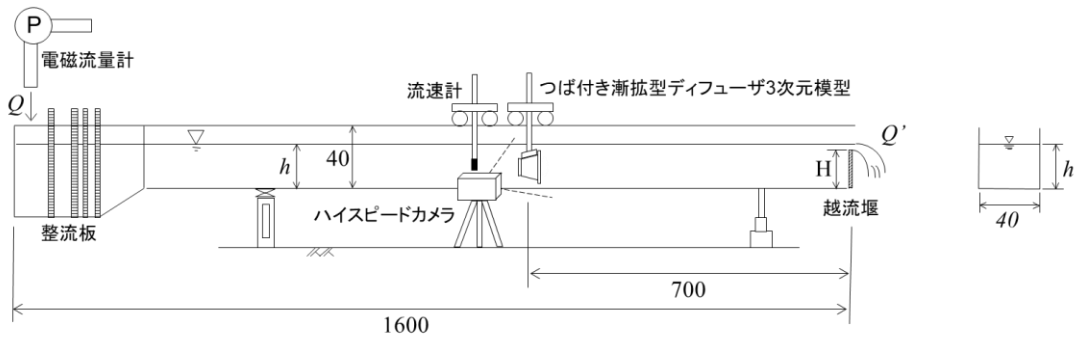


図-3 実験装置概要図(単位:mm)

調整した。なお、設定した主流流速は、現地の四季における潮流及び海流より発生しうる速度域を網羅するように設定した。実験では、つば付き漸拡型ディフューザによる増速効果がタービンの回転数に及ぼす影響を検証するため、水路斜め上方からハイスピードカメラを設置し、タービンの回転速度をビデオ解析により判読した。回転速度の計測は定常流場の実験であるが、適当な時間帯で6回程度行い、その平均値を用いた。

3. 2 解析方法

実験結果より得られたタービンの回転周期から以下の所量をそれぞれ計算して考察する。

$$\text{回転数 } f(\text{Hz}); f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

$$\text{主流流速の流れエネルギー } P(\text{W}); P = \frac{1}{2} \rho A u^3 \quad (2)$$

$$\text{タービンの回転エネルギー } P_b(\text{W}); P_b = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (3)$$

$$\text{Tip Speed Ratio(TSR)}; \text{TSR} = \frac{\text{Bladetip speed}}{\text{in-flow speed}} = \frac{u_b}{u} \quad (4)$$

$$\text{出力係数 } C_p; C_p = \frac{P_b}{P} \quad (5)$$

ここに T は平均回転速度(sec), ρ は流体密度(g/cm^3), A はタービン断面積(cm^2), u は主流流速値(cm/sec), I はタービンブレードの慣性モーメント(g cm^2), ω は角速度(rad/sec), u_b はブレード先端速度(cm/sec)を示す。なお、ここで(5)式に示す出力係数は、ディフューザに流入する主流流速がタービンブレードの回転速度に変換される機械的な効率として評価するものとする。

4. 実験結果

タービンの回転数 f と主流流速 u の関係を示したものを図-4 に示す。 u の約 2 乗に比例して f が増加しているが、低速域(図中の●印)に着目すると、急激にその回転数が増加していることがわかる。これはレンズ効果による速度域に合わせて最適化したため、その速度域で極端な増速効果が現れた結果と考えられる。これより高い速度域(図中の○印)においても、レンズ効果による増速により f の増加が認められるが、レンズ効果を最適化した速度域ほど増速率は大きくないことがわかる。

タービンブレードの回転エネルギー P_b 及び主流流速の流れエネルギー P と主流流速 u による関係を示したも

表-1 実験条件一覧

ケース	目標流速(現地)	越流堰高 H	水深 h	流量 Q	主流流速 u
Run	cm/sec	cm	cm	cm^3/sec	cm/sec
1	190	14	28	36800	37.5
2	170	17	30	36500	34.6
3	160	19	32	36300	32.5
4	150	21	34	36200	30.2
5	140	23	36	36200	28.1
6	125	27	40	36500	25.2
7	110	27	38.5	30000	22.4
8	100	27	37.3	27000	19.2
9	90	27	36.5	24000	17.5
10	80	27	36	22000	16
11	70	27	35.3	20000	15

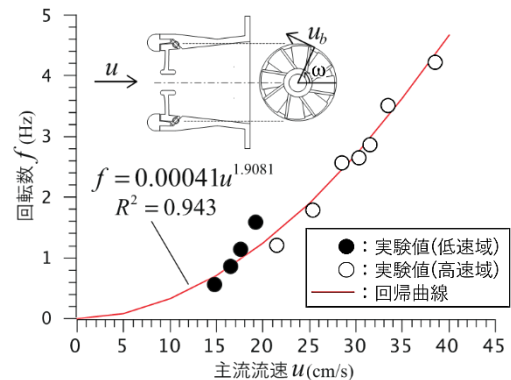


図-4 タービン回転数と主流流速値との関係

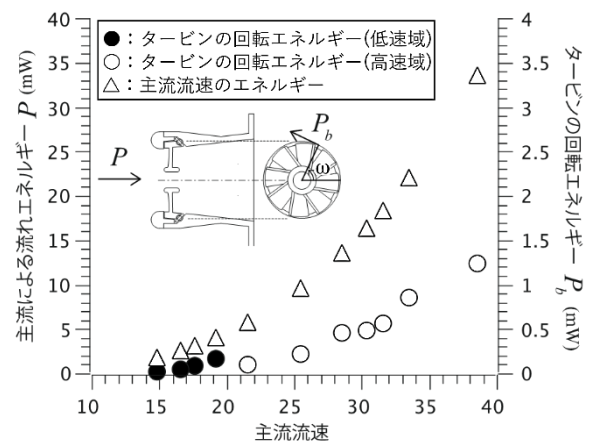


図-5 タービンの回転エネルギーおよび主流流速の流れエネルギーと主流流速値との関係

のを図-5 に示す。ディフューザ形状の最適化が図られた速度域における P_b (図中の●印)は P (図中の△印)の増加に伴いある一定の割合を有して増加しており、主流流速の増加に伴い一定の割合で P を回収しているといえる。しかし、これより高い速度域になると、 P の増加に伴い P_b (図中の○印)も増加するが、その増加率は鈍化し、 u が高速になるほど、その傾向は顕著である。 P の高い高速主流流速の場合、タービンによって回収できる P_b は P よりも1オーダー以上も低くなっている。

回転数 f と TSR の関係を示したものを図-6 に示す。ディフューザ形状の最適化が図られた 20cm/s 以下の低速度域(図中の●印)に着目すると、回転数が少ないものの、主流流速に対するタービンブレードの回転速度を示す TSR は急激に上昇している。しかし、それより高い速度域(図中の○印)においては、 f が上がっても TSR は頭打ちの状態になっている。これはディフューザ形状の最適化が図られた低速度域ほど、高速域ではレンズ効果による増速が顕著ではないことを示す。これに対し、主流流速が約 20cm/s の TSR は、主流流速がおおよそ 30cm/s の場合の TSR と同等なほど、低速域では高効率になっていることを示唆している。

TSR と出力係数 C_p の関係を示したものを図-7 に示す。最適化が図られた低速度域(図中の●印)では TSR の増加に伴い、効率も線型的に向上しており、TSR が 1 になると、それより高速域の効率に匹敵する C_p を算出している。一方、高速域(図中の○印)では TSR の増加に伴う C_p の増加率は、低速域に比べ緩くなっており、高 TSR では C_p の増加がやや頭打ちになっていることがわかる。これは高速な主流流速に対し、回転数の増加に伴い TSR が頭打ちになった結果、効率もその影響を受け、向上しないものと考えられる。

5. 結論

本研究において、最適化したつば付き漸拡型ディフューザ2次元断面形状を3次元模型化し、タービンブレードを組み込んだ上で津軽海峡における流況を再現した開水路に投入し、その回転数を検証した結果、想定した低流速域において効率的な回転数を得られることが確認された。また、エネルギー比から求められる出力係数や TSR においては、想定した流速域と高流速域では同等の数値を有していることが分かった。一方、高速域においては回転エネルギーへの変換効率が頭打ちとなる傾向が得られた。

今後は本研究で得られた結果を基に、効率的な回転数を得られる流速域を拡げることも念頭に置き、ディフューザや回転タービンの細部形状に関する検証を行っていく次第である。

謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金基盤研究(B)18H01537(代表：猿渡亜由未)の補助を受けた。また、実験に用いたつば付き漸拡型ディフューザ3次元模型の製作においては、函館高専生産システム工学科剣地准教授のご協力を得た。ここに記して謝意を表す。

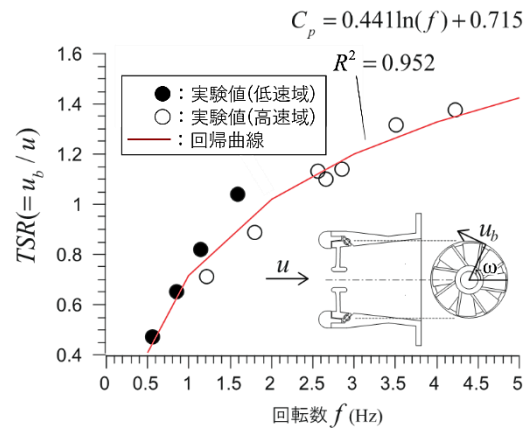


図-6 TSR と回転数との関係

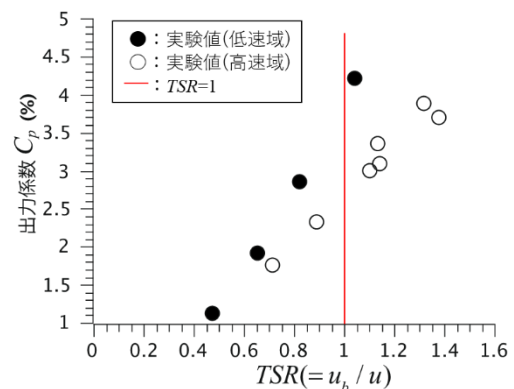


図-7 出力係数と TSR との関係

参考文献

- 1) 本間翔希, 宮武 誠, 猿渡亜由未: 潮流・海流発電に向けた津軽海峡の流況特性及びエネルギー賦存量に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 70 巻 2 号, pp.I_1291-I_1295, 2014
- 2) 本間翔希, 宮武誠, 猿渡亜由未, 広田知也: 津軽海峡の潮流・海流発電に向けた流況とエネルギー賦存量の四季的変動特性, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 71 巻 2 号, pp.I_1555-I_1560, 2015.
- 3) 本間翔希, 猿渡亜由未, 宮武誠: 津軽海峡における三次元密度構造の特徴化, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 73 巻 2 号, pp.I_67-I_72, 2017.
- 4) Nasir Mehmood, Zhang Liang, Jaawad Khan: Diffuser Augmented Horizontal Axis Tidal Current Turbines, Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 4(18), pp. 3522-3532, 2012.
- 5) 蛭子翼, 宮武誠, 猿渡亜由未: 潮流・海流発電装置周辺の流況に関する可視化実験, 土木学会平成 29 年度論文報告集, 第 74 号, B-43.
- 6) 蛭子翼, 宮武誠, 猿渡亜由未: 津軽海峡における潮流・海流発電装置のディフューザ断面形状に関する基礎的研究, 土木学会平成 30 年度論文報告集, 第 75 号, B-02.
- 7) 蛭子翼, 宮武誠, 猿渡亜由未: 津軽海峡における潮流海流発電のディフューザ形状が増速効果に及ぼす影響, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 75 巻 2 号, pp.I_973-I_978, 2019.