

# 潮流発電装置の実用化に関する調査研究

研究期間 平成11年度～平成14年度（4年計画）  
研究機関 海上保安試験研究センター技術第二課  
研究者 山本 信和

## I 目的

自然エネルギーを利用する上で潮流は、波力、風力及び太陽光に比べ、その発現の規則性が極めて高いことから、最も安定したエネルギー源である。

その安定した発現性から利用可能エネルギー量の確定が容易であり、電源システム設計における安全率を最小に設定出来ることから、適切な発電機容量及び蓄電池容量の選定が可能となる利点がある。

十分な発量が期待できる強潮流海域の灯浮標の基数は、限られるものの、潮流を航路標識用電源エネルギーとして利用することにより、電源容量の向上が容易に図ることが出来ること及び従来の波力発電や太陽光発電に加え、電源種別の選択肢が多様化する。

これにより、灯浮標に新たな機能追加する場合の電源容量拡大に対応が可能となる。

本研究は、同発電装置を開発し、実用化を図ることを目的としたものである。

## II 内容

### (1) 概要

本研究は、平成5年度から平成9年度まで行われた潮流発電装置の調査研究の成果をもとに、検討を加え、実用機の開発、試作、水路実験を経て実海域試験を行い、データ収集と分析を行い、実用機の仕様確定の基礎資料をまとめ、実機整備による実用に寄与したものである。

平成11年度は、実用化を目指して、潮流発電装置の改良設計を行い、第2号機の製作を行った。

また、これに併せて装置取付けに適切な標体と、取付け方法について考察するとともに、海域実験場所の潮流データを解析した。

平成12年度は、明石海峡航路中央第二号灯浮標で海域試験を想定した実用機的设计・製作を行い、平成12年12月の同灯浮標の全交換に合わせて、実海域試験を開始し、発電データの収集を行った。

本試験は、平成13年3月末に発生したと推定される外的要因による水車損傷事故により中断したものの、期待以上の発電量が確認された。

このように性能面では実用化の目処が付いたものの、運用面では、本発電装置が水中に置かれることから、外観の目視や機械動作の確認点検が困難である。

平成13年度は、実用に際し、考慮しなければなら

ない重要な要素である保守点検に係る問題の解決を目指し、通常、水中のある水車の外観や機械的動作の点検について、現場での容易な点検方法の考案と点検に使用する装置の設計を行った。

平成14年度は、航路標識整備事業により、明石海峡航路中央第二号灯浮標に実機の整備が行われ、実負荷へ電源供給する運用が行われることとなり、本発電装置の長期使用における性能検証及び機能向上の検討のため、ひとまず、同灯浮標の次期交換までの2年間のデータ分析を行うため、データ収集と伝送のためのシステムの考案と装置製作を行い、発電出力データの収集と分析を行った。

### (2) データ収集・伝送装置の検討

今年度の研究目的である実海域における発電特性分析のための潮流発電データについては、発電量を把握する目的から、発電機出力電圧、電流及び周波数を計測することとした。

灯浮標における計測システムでの問題は、消費電力とデータの回収方法であるが、今回の計測システムでは、負荷として無視出来る程度の消費電力のものとしたことから、電源は、灯浮標の電源（蓄電池）を利用することとした。

データの回収についても、現場が遠隔地の洋上となることから、携帯電話によるデータ通信サービスを利用して、定時毎にデータが試験研究センターにおいたパソコンで受信出来るシステムを検討した。

このため、データ収集（記録）と外部出力動作において、消費電力が微小なデータロガーを用い、データ伝送においても、パケット通信専用の携帯電話機を利用して、発電データを電子メール化し、インターネット経由で受信するシステムを構築することとした。

また、発電機出力電圧は、発電機の三相交流電圧を整流した後の直流電圧、電流は、シャント抵抗に発生した電圧、周波数は、三相交流の電圧が0Vを境に繰り返し変動することを利用して、パルス電圧として検出し、その繰り返し＝周波数として計測することとした。

この周波数は、発電機の回転数と比例することから、この計測により、潮流に対する発電機の水車の起動状態が分かる。

### (3) データ収集・伝送システムの概要

同システムの検討の結果、次の図1のような構成のシステムを構築した。

本システムの概要は、潮流発電装置の充電制御器端子に信号線を接続して、電圧、電流、周波数のデータを一旦、変換器に入力し、データロガーの入力レベルに変換して、データロガー内でサンプリングしながら、一定時間の平均値の演算を行い、内部メモリに記録すると共に、外部端子へ出力する。

このデータロガーは、データのサンプリング周期、内部メモリへの記録周期、演算データの外部出力周期及び計測データの演算式について、任意のプログラムを書き込み動作させるものであり、プログラムの容量にもよるが多少複雑な演算でも可能であり、非常に汎用性が高い。

また、内部メモリも2MBの容量があり、比較的大きなデータも記録可能である。

データロガーの外部出力は、RS-232Cで通信され、このシリアルデータを直接、電子メール本文に書き込む機能を有するデータメール変換アダプタ（以下、DMA-Sと）で電子メール化し、この電子メールをパケット通信専用の携帯電話機（Do-Pa 電話機）で予め指定したアドレスのパソコンにて送信する仕組みである。

このDMA-Sの特長は、電子メールでデータ通信出来ることであり、Do-Pa 電話機に接続して無手順通信を行うプロトコル変換器は、他にも類似品があるが、電子メールをサポートしていないため、データの送信先は、Do-Pa 網とLAN接続契約したネットワーク上の端末に限定されるが、このDMA-Sは、受信側において、専用のサーバも必要とせず、通常のインターネット接続の端末で送受信可能であり、簡易で安価なシステムが構築出来る。

また、DMA-S本体の価格も定価で5万円程度と安価である。

このため、受信側では、現在、一般的となったインターネットへの常時接続により、データが随時受信可能な状態となることから、送信（観測）側の通信設定時間も自由度が増し、パケット通信量と通信料金を勘案した経済的な設定が可能となる。

今回の場合は、初めのうちは特に、発電装置の動作状態把握を短い間隔で行うことが望ましいことから、経済性も勘案しつつ、通信時間を優先して2時間毎の通信時間とした。

発電システム構成図

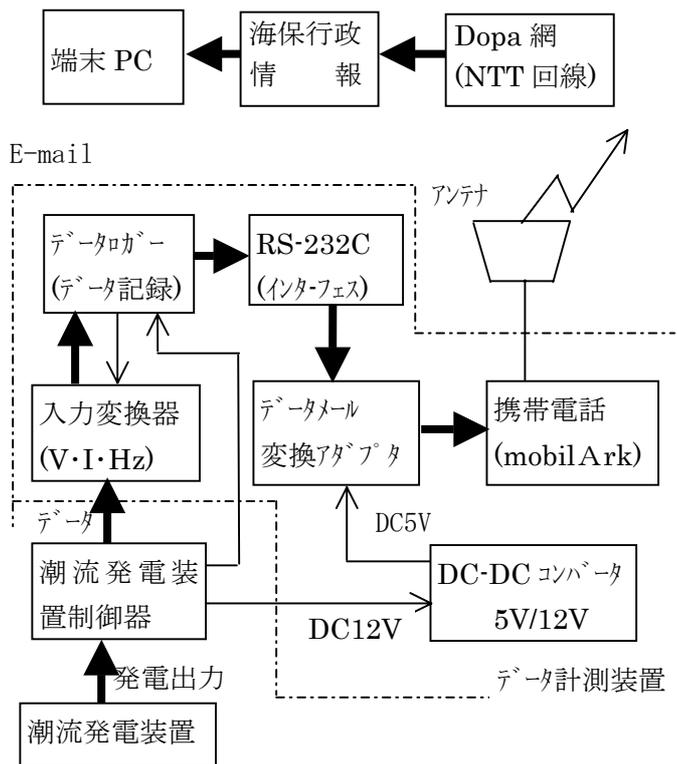


図1

### (4) データ収集・伝送システムの仕様

前述の(3)の概要で述べたシステムの仕様を述べる。

システムの外観を写真1～2に示す。

また、本システムの各装置の取付け状況を写真3～5に示す。

Do-Pa 電話機アンテナ  
(携帯電話用車載アンテナ)



写真1 データ収集伝送装置 (全体)

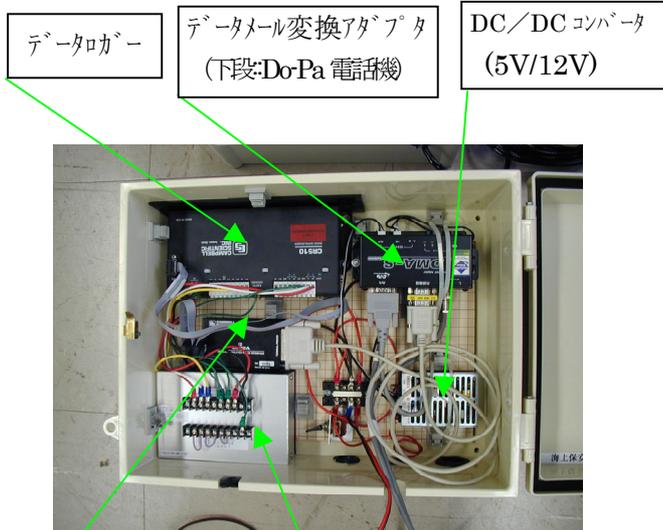


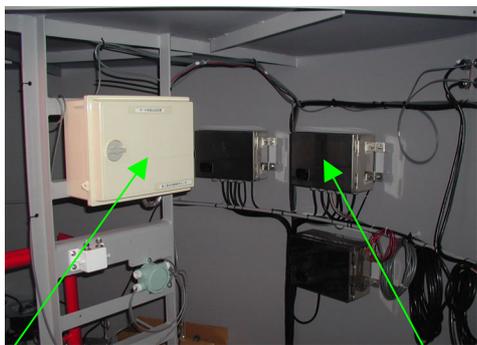
写真3 入力変換器（発電出力をデータロガーで計測するに適切な値に変換）

RS232C I/F  
 (データロガーで記録した信号出力を外部機器【ここでデータメール変換アダプタ】に適合するよう変換)

写真2 データ収集伝送装置 (アンテナ除く)



図3 通信試験



データ収集伝送装置 (計測システム)

潮流発電制御装置 (手前: 発電制御部、奥: 充電制御部)

写真4 データ収集・伝送装置 配置



写真5 データ収集伝送装置のアンテナ部取付状況 (やぐら部踊り場)  
 以上の図1並びに写真1～5に示したデータ収集・伝送システムの構成装置の仕様を次の表1に示す。

(イ) データロガー : C-CR510  
 (CAMPBELL 社製 U.S.A)

アナログ入力	3ch
パルス入力	低周波 1ch
デジタル I/O	1ch, RS-232C 1ch
電源	DC12V
消費電	データ記録動作中 46mA、 演算処理中 13mA、 休止中 1mA
寸法、重量	70*175*45 450g

(ロ) データメール変換アダプタ  
 DMA-S(株)ハネロン 製 大阪)

機能	シリアルデータを直接電子メールに変換
通信ポート	RS-232C
電源	DC5V、消費電流 50mA
寸法、重量	135(W)*56(D)*35(H) 、 220g

(ハ) Do-Pa 電話機  
 (Mobil Ark 9601D NTT-DoCoMo)

通信方式	PDC800MHz シングルパケット方式
通信速度	9600bps
DTE インターフェース	RS-232C
電源	DC5V、 消費電流 320mA 以下
寸法、重量	115(W)*56(D)*24(H)185g

また、潮流発電装置が整備された灯浮標及び発電装置の外観を写真6～写真8に示す。



写真 6



写真 7 設置状況

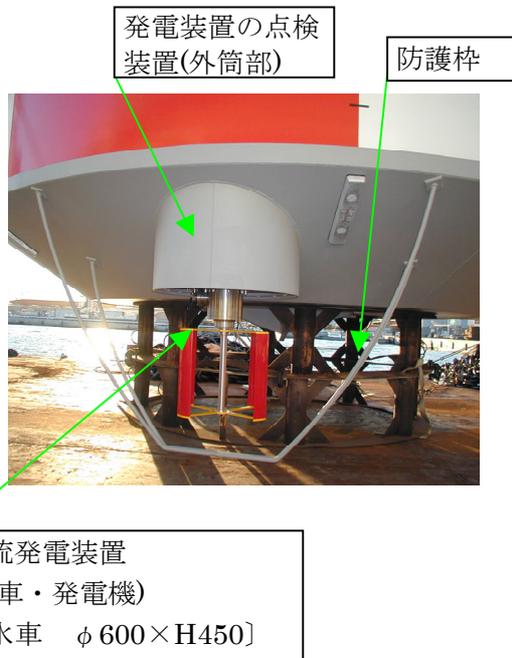


写真 8 潮流発電装置

### Ⅲ 結果

前述の 3. (2) のシステムを使用してデータ収集の状況は、次のとおりである。

- (イ) 2 時間毎に電子メールで送信されるデータは、計測開始の平成 14 年 12 月 13 日から平成 15 年 3 月 28 日までの間で、得測率 98% で概ね良好に受信できた。
- (ロ) 一部に電子メールが受信されていない時間帯があり、結果と欠測となったため、2% の欠測となったが、データ解析には支障のない回数である。  
原因は、特定できないが、メールサーバの障害と推測される。
- (ハ) 受信データの中で測定項目の欠落などは無く全て揃っている。
- (ニ) 受信設定時刻に対し、受信時刻が大幅に遅延する例は無かった。

以上の状況で受信出来たデータについて、電力の算出を行い、潮流の流速推算データと合わせ図化した平成 14 年 12 月～平成 15 年 3 月までのグラフを図 2～図 5 に示す。

これらのグラフにおいて、平成 14 年 1 2 月の分は、計測開始が 13 日からであり、それ以前のデータはないため、横軸の日数も省略した。

また、2 月のグラフにおいては、途中の 3 日～16 日まで発電停止のため、出力が零となっている。

3 月のグラフについては、データ整理の都合上、28 日までとなっている。

さらに、平成 12 年度までの研究成果を元に設計製作された発電装置の実働効率がどの程度であるか、試験時と条件が異なることから、確認する必要があり、当時の発電量推算値と今回の実測データと比較した。電力は、計測された 10 分平均値の電圧と電流の積を 1/6 として電力とし、1 日分積算している。

また、流速は、値が刻々変化するものであるが、便宜的に日変化として表現するために 10 分毎の絶対値を 1 日分加算して、日毎の合計値、即ち、総エネルギーの違いで変化を表した。

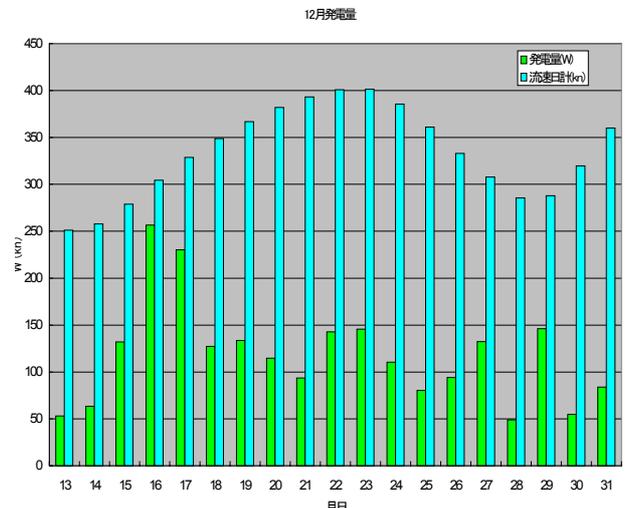


図 2

## IV 結果の考察

### (1) 概要

12月、1月分のデータにおいては、流速の変化に同調した発電が確認され、正常に動作していることが分かる。

2月の図化データにおいて、3日から16日まで、電力が零で記録されていることは、先に述べたが、これは、実際に、この間、発電停止した状態が続いたものである。

この原因は、発電停止確認後、水中カメラで調査したところ、大量の大きく成長した海草（藻）が発電機主軸とケーシングの間に巻き付き、また、水車翼にも藻の端部が接触して起動を妨げていたことが判明した。

復旧のため、潜水作業を行う予定にしていたところ、16日から水車が回転し始めた兆候が記録され、17日からは完全に復旧した。

これは、潮流、標体の動揺など物理的要因により、自然に藻が外れたと考えられる。

藻が絡む要因としては、水車の回転が停止しているか若しくは低速回転をしていた状態において、藻が接触して巻き付き、その後、水車の回転上昇時に強く巻き付くものと推測される。

水車が一定速度で回転している場合は、接触したものの対し、回転包絡面の接線方向へ押し出す力が働くため、内側へ引き込むことはない。

このため、流木や曳航索のように硬度や長さが大きいもの以外は、絡むことは無いとの想定でいたが、今回の事例を受け、何らかの対策を検討する必要があるが、発生率の確率や対策の費用を考慮しなければならないと思量される。

3月のデータにおいては、10日以降の発電量が低下している。

これは、計測システムのうち、入力変換器（アソルト）の電圧の計測値範囲拡大のため、同装置を交換した後、計測される電流値が小さく、不安定となったことに起因している。

その原因は、今後の調査に委ねるが、正常の値ではないと推測される。

なお、同入力変換器を交換した理由は、それ以前において、発電出力が大きくなった時に、電圧も高くなるが、この高い電圧の値が計測範囲(定格0~15V、実測範囲0~18V)外であるため、正常に記録されないことが頻発したため、この解消のため、2倍のレンジのものに交換した。

次に、今回計測したデータが、平成12年度の試験データに比べ、どの程度の効率で発電したか比較を図6に示す。

1ヶ月間すべて計測データが揃っているのは1月分のみであるから、この1月分を比較することとする。図6からは、今回の発電量は、当初の推算発電量に比べ、

1月発電量

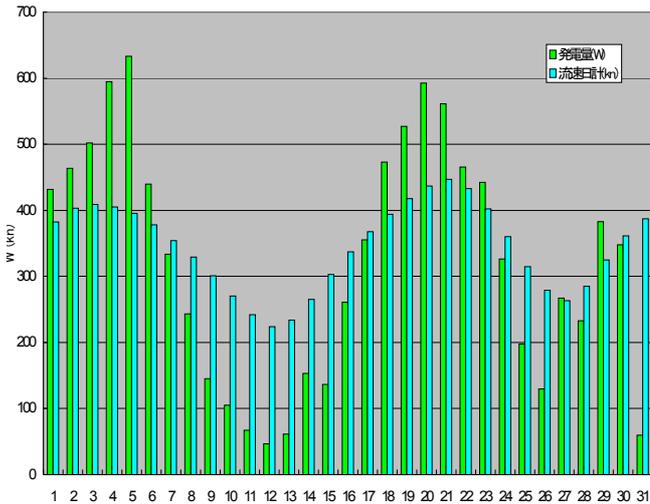


図 2

2月発電量

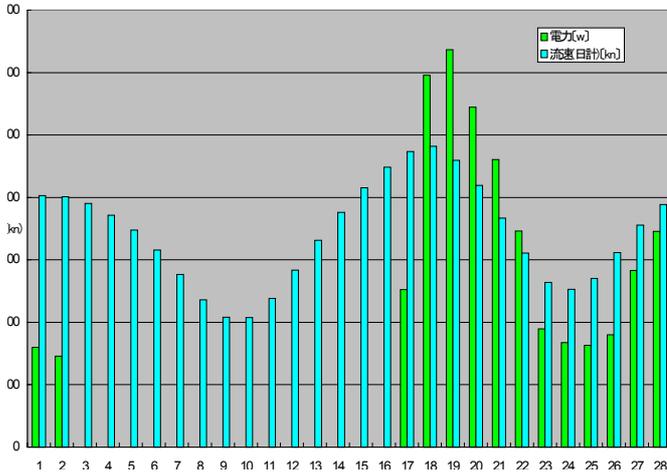


図 3

3月発電量

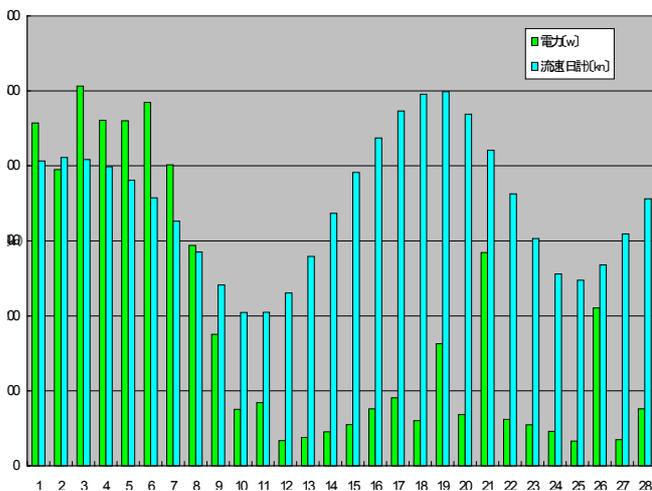


図 4

少ないことが分かる。

比率は、68.8%である。

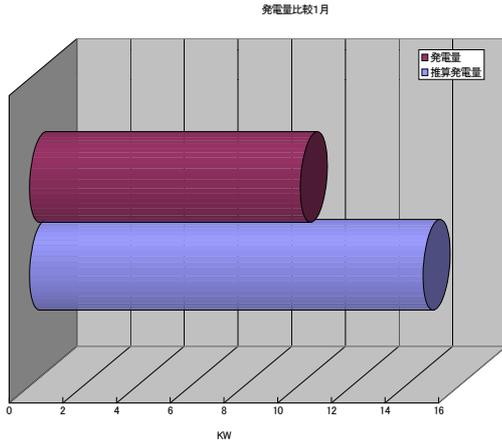


図 6

1ヶ月分から、全体を判断するのは、適切でないが、他の月においても同等の傾向にあることから、平成13年度に報告した推算発電量を下回することは否めない。

この原因は、2点考えられ、一つは、発電装置取付け部の標体の形状及び水車を包囲する防護枠の存在が水流の乱れを誘発することである。

発電装置取付け部の標体形状の違いは、平成12年度の実験では、標体の浮体下面に鋼板をコの字形にした座に直付けしていたため、発電機周辺に乱流を誘発する要因となる構造物が少ないことに対し、今回の装置は、維持管理のための点検装置の外筒が浮体仮面から突き出した形で存在し、水流方向に対し、直交する方向で壁面が存在していることから、乱流を起こす要因となっている。

また、水車の周囲を囲むような形状で防護枠（棒鋼）が存在し、これも乱流を起こす要因となっている。

実機での水槽試験が出来ないため、その影響度を定量的に確認していないが、今後は、シミュレーションで推算するなどの検討も必要があると考えられる。

二つ目は、発電機の負荷の違いであり、平成12年度の実験において試験した発電装置は、比較的消費電量の大きい計測装置の電源として使用した蓄電池に充電しており、この蓄電池が常時、消費されているため、強潮流時に発電出力が大きくなると、必ず、充電電流が一定量流れ、結果、発電量も増加した。

一方、今回の場合は、計測システムも消費電力が小さいこと及び灯浮標の負荷も大半が夜間のみ消費する負荷であることから、蓄電池は常時、満充電状態であるため、充電電流も流れずかつ、蓄電池端子電圧も高いため、発電側の電圧が低い場合は、負荷側へほとんど電流が流れないため、発電電流として小さな値しか記録されない。

また、強潮流時に強制的に発電機が高回転するため、

発電出力が大きくなるが、発電装置の制御器には、蓄電池電圧が一定以上になると、保護のため、ダミー抵抗へ切り替え、電力を消費する仕組みがあり、この場合、発電電圧、電流が一定値記録されることになるのであるが、切り替わりの際の僅かな時間、一旦、無負荷状態となり、さらに、出力端子電圧が高まり、計測エラーが生じていたものと推測され、記録されたデータは、レンジオーバーを示す数値となっていた。

構造にかかる発電効率の低下は、当初から予想しており、今回の検証実験で解析することとしてことであるが、二点目の要因も加わり、予想より大きな低下となった。

## (2) 推算データの計算

推算データは、次の理論によってもとめたものである。

### (イ) エネルギー理論

発電量の推算データは、次の理論で計算される。流体の運動エネルギーPは、次式で与えられる。

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad \dots\dots ①$$

$\rho$  : 流体密度 [kg/m<sup>3</sup>]

A : 流れに垂直な断面積 (掃過面積) [m<sup>2</sup>]

V : 流体速度 [m/s]

理想水車が自然流から取り出すことのできる最大軸出力  $P_{i,max}$  は、次式で表される。

$$P_{i,max} = \frac{8}{27} \rho A V^3 \quad \dots\dots ②$$

①、②式より、水車理論効率の最大値  $\eta_{i,max}$  は、次式となる。

$$\eta_{i,max} = \frac{P_{i,max}}{P} = 0.593$$

実際の水車では、水車出力係数 (Power Coefficient)  $C_p$  として表すので、水車軸出力  $P_i$  は一般に次式で示される。

$$P_i = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \quad \dots\dots ③$$

③式より、理論的に潮流の有するエネルギーは、海水の密度  $\rho = 1,025 \text{kg/m}^3$  とすれば、流速 1 m/s (約 1.94kt) で、流れに垂直な断面積 1 m<sup>2</sup> 当たり約 500W である。

$C_p$  の値は、水車により違い、プロペラ方式では 0.3～0.4、ローター方式では 0.2～0.3 であるので約 100W～200W の水車軸出力が得られる。更に、③式より明らかなように  $P_t$  は流速の 3 乗に比例するので流速 2m/s (約 3.88kt) になると水車軸出力は、800W～1600W が得られることになる。

ただし、この数値は、発電機の機械損失を含む発電効率が考慮されておらず、実際の出力は、実験水路(回流水槽)において発電特性を計測して求める必要がある。

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

$\rho$  : 流体密度 [kg/m<sup>3</sup>]

A : 流れに垂直な断面積 (掃過面積) [m<sup>2</sup>]

V : 流体速度 [m/s]

(ロ) 発電効率の推定

平成 12 年度の実験において、連続して記録された期間(平成 13 年 2 月 17 日～3 月 30 日)のデータを解析した結果、次のようになった。

- ・ 実験期間 (記録計動作期間)

平成 13 年 2 月 16 日 10:36～

平成 13 年 3 月 30 日 12:33

- ・ 発電出力記録期間

平成 13 年 2 月 17 日 04:40～

平成 13 年 3 月 30 日 19:19

974.65 時間 (40.61 日)

- ・ 実測発電量

18,282.2W (18.2KW)

発電量の計算は、1 分間毎に記録された電圧、電量を 1 分平均値として、その積を 1/60 値として総計したものである。

- ・ 日平均

450.1W/日

これに対し、この実験の発電出力記録期間の流速値から発電量を求めるとつぎのようになる。

計算は、(イ) エネルギー理論の項に示した③の式により、 $C_p=1$  として水車軸出力を求め、この値と先の実測発電量の比率を求めると、それが発電効率(水車効率を含む総合効率)となる。

平成 13 年の当該海域での潮流の流速推算データは 10 分単位で算出しているので、これを 10 分間平均値として考え、かつ、発電出力の発生条件である流速 1.2m/s (2.33kt) 以上を発電可能流速として計算した。

- ・ 発電量

588,713.5W (588.7KW)

- ・ 計算対象流速発生時間

500.33 時間 (20.84 日分)

※記録計動作期間 (平成 13 年 2 月 16 日 10:36～平成 13 年 3 月 30 日 12:33) の流速が 2.33kt 以上となる時間の合計

- ・ 発電効率

0.031

18282.2/588713.5=0.031

この発電効率を以って、年間を通じての期待発電量を求めるとつぎのようになる。

- ・ 総発電量

171,382W/年 (171.3KW/年)

- ・ 延べ日平均発電量 469.5W/日

- ・ 平均日発電電量 39.1ah/日 (12V 条件)

- ・ 2.33kt 以上の流速発生時間の合計

4,495 時間 (187.29 日分)

以上のことから、当該海域(明石海峡)においては、発電可能流速の日時が 51% であるが、流速に応じて大きな出力が期待されることが分かる。この推算結果を日別及び月別にまとめたグラフの 1 月分を図 7 に示す。

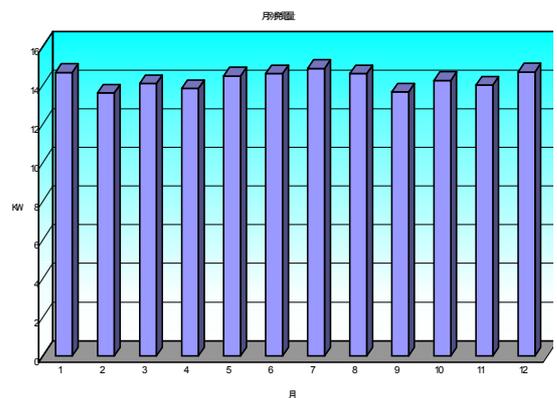


図 7

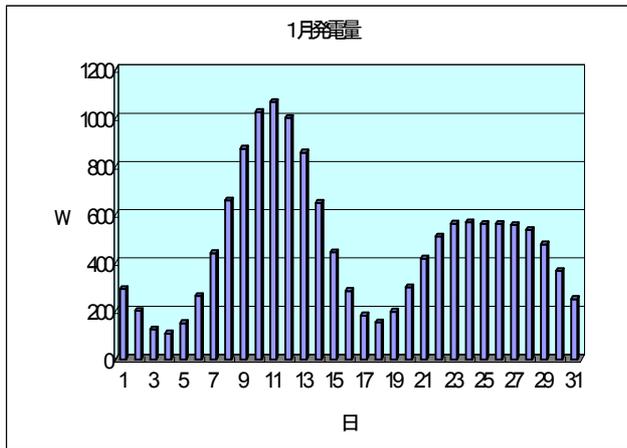


図8 年間月別発電量

図8は、明石海峡での月別の総発電量を示したものであるが、大潮の発生頻度が高い月は、当然ながら総発電量も大きい。最大の月と最小の月の差は僅かであり、最小月の発電量の総計は、最大月の総計の90%である。

これも、年間を通じて規則性のある潮流が繰り返され、その流速の最大値も日毎では差が大きいものの、月単位では、平均していることが分る。

## V 成果・まとめ

測定開始から未だ3ヶ月余であるため、結論的なことは述べる段階ではないが、現時点で推測出来たこととしては、点検装置の外筒、防護枠の存在が発電効率に影響を与えており、時期を経て、海洋生物付着が発生した場合は、さらに効率低下が進むと推測され、その程度を見極める必要がある。

また、藻の絡みの実例を鑑み、再度、絡み防止構造の検討を要するが、現実的には、平成12年度に設置した試験装置の水車翼が、実験開始から4ヶ月目で一部破損して強度低下の状態でも2年間経過した後も同じ状態であった事実から、少なくとも浮遊物の衝突は無かったものと推測される。

よって、今回の障害の件についても、極まれな事例とも考えられ、今後の浮遊物の絡み等の発生率(頻度)を確かめた上で、対策による発電効率の変化及び対策の経済性を勘案して結論を出すのが適切と思慮される。

従って、今後も継続してデータを収集し、データ分析を行い、海洋生物の付着状況と発電効率の変化を確認し、長期運用のための維持管理の確実化を図るため装置の改良の資料を得ることとする。