

潮汐を利用した再生可能エネルギー発電の提案

重松 利信・嶋田 英樹*・小野 文慈**

岡山理科大学 工学部バイオ応用化学科

* (独) 国立高等専門学校機構・佐世保工業高等専門学校 電子制御工学科

** 国立大学法人・佐賀大学 文化教育学部人間環境課程

(2017年10月30日受付、2017年12月4日受理)

1. はじめに

「地球温暖化に代表される環境問題・エネルギー問題に、世界が大きな注目を寄せている」と耳にして久しい。それらに対する日本の取り組みの歴史は古く、1973年の第一次オイルショックを契機に新エネルギー技術開発としてサンシャイン計画が実施され（1974年～1992年）、1978年からはムーンライト計画が、1993年からはニューサンシャイン計画が実施された¹⁾。これらは環境保全、経済成長、エネルギー需要安定対策のための新エネルギー・省エネルギー技術、環境対策技術の推進として実施された。第二次オイルショック（1978年）時には、当時の大平正芳内閣総理大臣が公式な場で半袖のスーツ「省エネスーツ」を着用していたのが記憶に残っている方も多いであろう。しかしながら、省エネスーツは定着せず、大量消費・オール電化へと流れていった。そのような中、2011年3月11日に起こった東北地方太平洋沖地震とそれに伴う福島第一原子力発電所の惨事は、環境・エネルギーに対する人々の意識を大きく変えた。我々は自らエネルギー論争に加わるようになり、再生可能エネルギーに大きな期待を寄せ、従来の太陽光や水力に加え、風力、波浪、潮流、地熱、バイオマスなど様々な観点のエネルギー源の模索に注目している^{2) 3)}。

さて、日本は四方を海に囲まれており、200海里の排他的経済水域（EEZ）の面積では世界第6位という資源大国である。そのため海洋の再生可能エネルギーを積極的に利用した発電も開発されてきた。ここで、海洋の再生可能エネルギーとは、海流、潮流、波浪、温度差、塩分差などで、海上風もこの中に含まれている。これらの中でも実用化の段階にあるのは、洋上風力発電と潮流発電である。長崎県五島市杵島周辺海域では平成25年を目処に2 MW級の洋上風力発電の実証機の設置が予定されており、現在、まさに100 kW級の小型の洋上風力発電装置が試験されている⁴⁾。また、潮流発電については、環境省の旗振りの下、2014年から「潮流発電技術実用化推進事業」を実施されており⁵⁾、2018

年には500kW級の発電設備の実証実験が行われる予定である⁵⁾。

ところで、海や湖には潮汐力による干満があり、50万トンもの大型タンカーでさえ、上下に運動している。ここから有効なエネルギーを取出すことが出来れば、更に再生可能エネルギー活用の試みが加速するのではないかと考え、新発想による潮の干満を利用した発電装置、いわゆる潮汐発電装置の開発を試みた。以下、その開発について詳説する。

潮汐発電は、周期的な現象を利用しているため、発電量の予測ができ、計画的な発電が可能であるという利点がある。一方で、大きな干満差が必要であり、大規模な建設を行わなければならないため、日本には設置の条件を満たす場所は少なく、潮汐発電に関する研究開発はほとんど行われていない。例えば、鹿児島県の甕島の瀬戸で潮汐発電施設の建設を検討されたが、実現には至っていない⁶⁾。

2. 潮汐発電装置

2-1 潮汐発電の現状と問題点

潮汐発電は潮汐力によるエネルギーを利用した発電方式を指し、周期的な現象を利用しているため、発電量の予測ができ、計画的な発電が可能であるという利点がある発電方法である。そのエネルギーは地球全体で見ると、 3×10^9 kWにも達する。

現在行われている潮汐発電は、干満による潮位差を利用し、例えば湾の入口に水門を設置し、貯水池をつくって海と分断する。こうして、満潮時には貯水池の

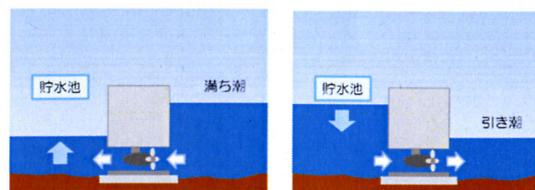


図1 一般的な潮汐発電の模式図。満潮時（左図）と引潮時（右図）

水位が海面よりも低くなり、干潮時には逆に貯水池の水位が海面よりも高くなる。この状態で水門を開くと、満潮時には海から貯水池へ、干潮時には貯水池から海へ水位差による海水の流れが生じ、この流れによってダムに設置した水車を回転させて発電を行うものである(図1参照)。このため、有用な発電施設の条件には、大きな干満差と巨額な初期投資が必要となる。

表1 世界の代表的な潮流発電施設の諸元表^{2) 7) 8)}

発電所名	発電機容量	広さ	最大干満差	可動開始年
FRANCE Rance Tidal	240MW	22.5km ²	13.5m	1966年
Canada Annapolis Tidal	20MW	90km ²	10.9m	1984年
Korea, Sihwa Lake Tidal	254MW	100km ²	4.7m	2011年

代表的な世界の潮汐発電所を表1に示した。潮汐発電所が設置されている場所は、いずれも干満差が大きく、広大な貯水面積を有している。

一方、日本には干満差が十メートルある地域はなく、最大でも有明海の最大5mである。このように干満差の小さい日本では、潮汐発電に関する研究開発はほとんど行われてこなかった。

ところで、5mといえ、秒速0.1mmの潮位変化でしかない。これまでの思想に従った潮汐発電実現には、干満差を補うほどの広大な貯水施設と初期投資が必要であるが、現在の日本に、それほどの余力があるとは思えない。

そこで、広大な貯水施設を用いず、秒速0.1mmの潮位変化から、如何にしてエネルギーを取り出せるかが、我々に課された問題であった。

2-2 発条バネを用いたエネルギー貯蔵

上記問題の解決策の一つとして、我々が注目したのが発条である。発条バネを用いれば、ゆっくり変化をゆっくりと貯めることができるばかりか、広大な貯水施設も莫大な初期投資も必要ない。

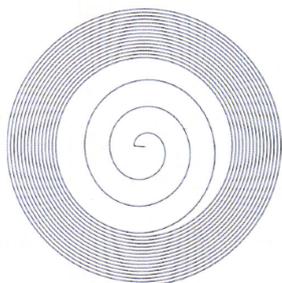


図2 一般的な発条バネの形状

発条バネは、断面一定な帯状材料をその中心線が一平面上で渦巻き状となるように巻いたもので、その一端にトルクを与えることによる曲げの弾性的変形をばね作用として利用する。限られた空間内で、比較的大きなエネルギーを蓄積することができ、昔からある技術であるため、成形が比較的容易である。

さて、発条バネ全長にわたって一定モーメントで負荷が与えられると仮定したときの軸のトルク T および、発条バネに蓄積される単位体積あたりの弾性エネルギー U は次式で表される。

$$T = k\varphi = \frac{Ebt^3}{12l}\varphi$$

$$U = \frac{1}{2}E\varepsilon^2$$

ここで、 k はばね定数、 b は板の幅、 E は縦弾性係数を示し、 t は厚み、 l は発条バネの展開長、 φ は変位角、 ε はひずみを示している。例えば、1kgの鋼の発条バネが弾性範囲の0.2%までひずまされるとして、蓄えられる弾性エネルギーは約50Jであり、これを60秒間で開放すると、平均のパワーは約1Wとなる。

実際の発条バネのトルク特性は、図3のようにヒステリシスを示し、巻き上げ時のトルクに比べ、解放時のトルクは下がる。また、発条バネは十分に巻き上げられると、取り付けの関係からトルクは急激に立ち上がる。したがって、少し巻き戻した状態のトルクを最大トルクと考える。一方、巻数が小さくなると、トルクはある点から急激に減少する。ここで通常は、その中間のトルクの変化が少ない巻数の区間を利用することで、ほぼ一定のトルクを持続的に得ている。

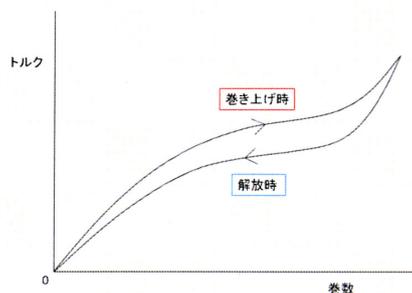


図3 発条バネのトルク特性⁹⁾

2-3 発条バネを用いた潮流発電装置の全体構成

本構想の潮流発電装置は、潮位の増減を回転に変える浮体部とゆっくりとした回転を弾性エネルギーとして貯蓄し、電気エネルギーに変換する蓄エネルギー・発電部からなる。

海面に浮かべた浮体の、潮汐現象による満潮あるいは引潮の直線運動を、ボールねじ機構を用いて回転運動に変えて発条バネを巻き上げる。その後、発条バネ

に蓄えられたエネルギーを利用して発電を行う構想である。

2-4 浮体部

浮体の上下運動を回転運動に変えるためにボールねじを用いると、潮が満ちる場合と干潮になる場合とで、ボールねじの回転方向が変わる。クラッチなどを用いて、それを変える手法もあるが、大型で複雑なるので、今回は干潮から満潮へ移る約6時間の潮汐の動きに注目した開発を行った。

浮体部の構成を図4に示す。海面に浮かべた浮体は、潮が満ちてくるのに合わせて上昇する。それに伴い、中央のボールねじが回転し、ボールねじの先端に取り付けた傘歯車により、回転軸の向きが垂直方向から水平方向へ変更されて、発電機にその回転が伝達される。潮汐発電装置は、その回転運動を利用して、発条バネを巻き上げる構成である。

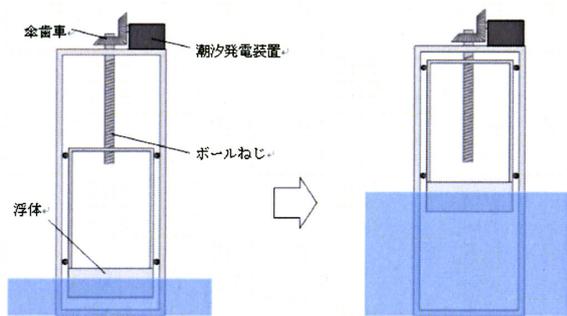


図4 潮汐発電装置の概略図

浮体の大きさは、発条バネの巻き上げトルクによって規定される。この度使用した発条バネは巻き上げトルク $3.6Nm$ を選定し、それに伴い浮体は約200ℓの容器を用意した。

潮汐発電装置を載せる上部は、1.5m×1.5mの広さを取り、ボールねじの有効可動域を干満時の潮位差から3mとした。このシステム全体の重量は、大きな波浪時でも流されないことを考慮して、約100kgである。勿論、実際に海に設置する場合は、海底に固定できるように、装置下部にアンカー用の工夫をしている。

2-5 蓄エネルギー・発電部

蓄エネルギー・発電部は、ボールねじから傘歯車から回転を受け取り、発条バネへと繋がる蓄エネルギー部と発条バネが貯めたエネルギーを電気エネルギーへと変える発電部から成る。ボールねじから伝えられた回転は、傘歯車を通して発条バネへと伝えられる。発条バネはゆっくりと蓄エネルギーする。十分な蓄エネルギー状態になると、発条バネは傘歯車との軸を切り、

発電機と軸を繋げ貯めたエネルギーを解放する。この軸の切替を行うために、遊星歯車機構を用いた。

図5に蓄エネルギー・発電部の構成を示した。傘歯車の軸、発条バネ軸はそれぞれ、遊星歯車機構の太陽歯車、遊星キャリアにつなげており、お互いの軸の接続・切離を実現している。発条バネの巻き上げ時は、内歯車を固定して、遊星歯車機構をプラネタリ型で使用する。このため、遊星歯車機構によって発条バネの軸は、傘歯車の軸の3分の1の回転速度、3倍のトルクで回転することになる。発条バネを20回巻き上げると、遊星歯車機構の内歯車の固定を解除する。内歯車の固定が解除されることで、傘歯車の軸とぜんまいばねの軸は無関係に回転することができるため、傘歯車の軸はそのまま一定速度で回転し続け、発条バネの軸は弾性力に従って巻き戻り始める。次に、発条バネの解放時は、増速機構を通すことで、軸の回転を約60倍に増速して発電機に伝える。発条バネの軸の1回転で発電機は約60回転するため、20回の巻き上げで発電機は約1200回転することになる。この回転により効果的に電気エネルギーを得ることができる。更に、発条バネが解放の状態から巻き上げの状態に移るとき、軸の回転方向が切り替わることによる衝撃は大きく、発条バネを傷める可能性がある。そこでその衝撃を緩和するために、増速機構の歯車の一つに、ワンウェイクラッチを組み込んだ。

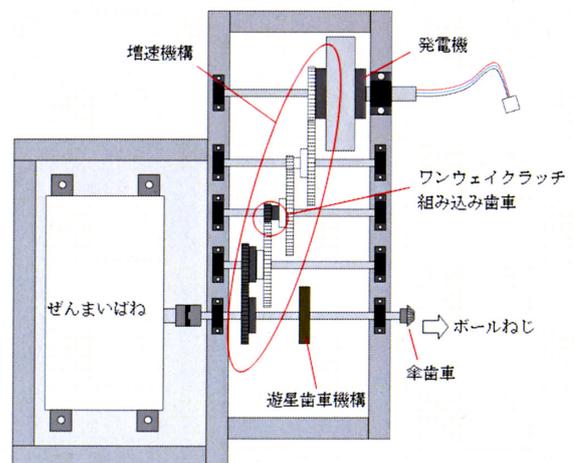


図5 蓄エネルギー・発電部の概略図

今回使用した発条バネは、巻き戻りトルクが $1.8Nm$ で、トルクが安定する巻区間が、15巻から35巻までの20回転のものを用いた。この発条バネユニットの内部には、ぜんまいばねが15巻を下回って巻き戻らないようにするためのストッパー機構と、35巻を超えて巻き上げが行われないようにするリミッター機構を付けている。表2に発条バネの仕様を示す。

表2 ぜんまいばね仕様

厚み	0.57mm
幅	30mm
長さ	28500mm
最大巻き締めトルク	360.38kg・mm
最小巻き締めトルク	281.57kg・mm
最大巻き戻りトルク	215.37kg・mm
最小巻き戻りトルク	145.25kg・mm

今回使用した発電機は(株)スカイ電子製のSKY-HR160を用いた。SKY-HR160発電機は、小型風力発電用として特別に設計・製作されたもので、低速回転でも高出力が得られる仕様である。構造は、磁石部分が回転する回転界磁形であり、鉄心が使用されていないため、コギングトルクや鉄損が発生せず、始動がスムーズであるという特徴がある。SKY-HR160発電機の仕様を表3に示す。

表3 回転数と出力

回転数	200rpm	350rpm	500rpm
電圧 [V]	21.6	38.18	54.16
電流 [A]	0.785	1.404	1.993
出力 [W]	16.94	53.51	107.67

3. 性能試験

3-1 蓄エネルギー・発電部の性能試験

完成した蓄エネルギー・発電部の発電能力を調べるために、ボールねじの回転の代わりに、ステッピングモータを取り付け、性能試験をこなった。性能試験では、発条バネを20回転巻き上げた後に、発条バネを開放し、発電機の出力量の時間依存性を測定する。発電機への負荷は、負荷の大きさによる出力電力の変化を検証するため200Ω、400Ω、800Ωの負荷をつないでの測定では出力電圧と出力電流とを測定し、発電力を算出した。図6に無負荷時の出力電圧の時間依存の結果を示す。

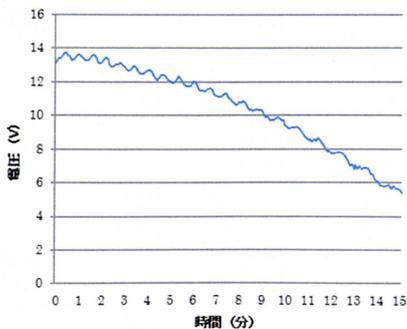
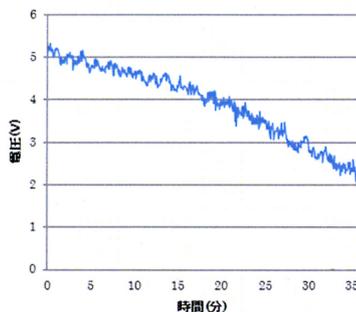
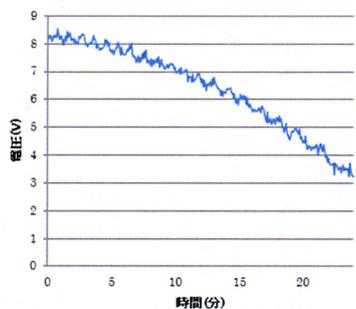


図6 無負荷時の出力電圧の時間依存

次に図7、図8、図9にはそれぞれ200Ωの負荷、400Ωの負荷、800Ωの負荷をつないだ時の出力電圧の時間変位と出力電流の時間変化を示す。

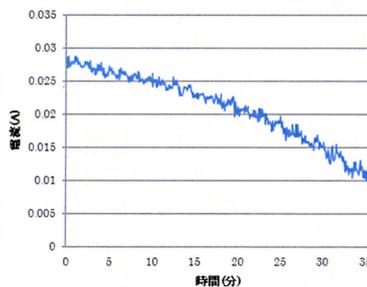


(a) 出力電圧(負荷200Ω)

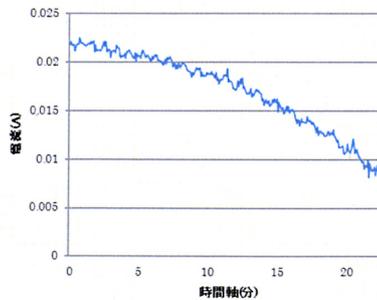


(b) 出力電流(負荷200Ω)

図7 負荷200Ωの出力電圧・出力電流の時間変化

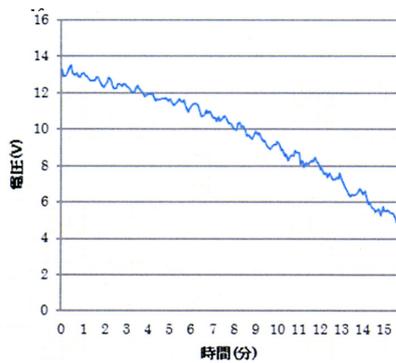


(a) 出力電圧(負荷400Ω)

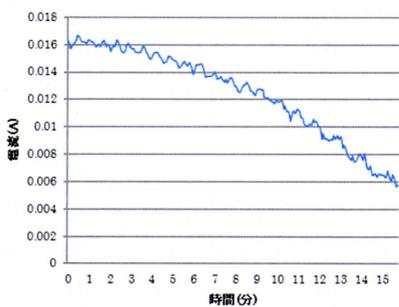


(b) 出力電流(負荷400Ω)

図8 負荷400Ωの出力電圧・出力電流の時間変化



(a) 出力電圧(負荷800Ω)



(b) 出力電流(負荷800Ω)

図9 負荷800Ωの出力電圧・出力電流の時間変化

以上の結果から、それぞれの負荷での出力電力の時間依存を計算した(図10参照)。

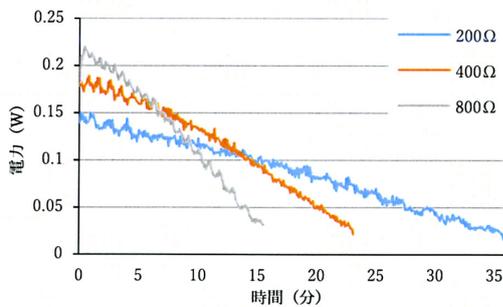


図10 それぞれの負荷での出力電力の時間変化

図10より、面積を積算し、発電機が回転し始めてから停止するまでに発電した発電量を算出する。発電量 W は次式に従う。ここでは、 $\Delta t = 5s$ として算出する。また、 P_n は n 番目の電力の値である。

$$W \cong \frac{\Delta t}{2} \cdot P_0 + \sum_{k=1}^{n-1} \Delta t \cdot P_k + \frac{\Delta t}{2} \cdot P_n$$

上式によって算出した発電量は、

800Ω負荷の時は約123J,
400Ω負荷の時は約159J,
200Ω負荷の時は約186J

となった。

3-2 性能試験結果の考察

無負荷時の出力電圧は約13Vから約6Vまで徐々に減少している。これは、ぜんまいばねが巻き戻るのに伴い、今回利用したぜんまいばねのトルク範囲である約 $1.9N \cdot m$ から約 $1.7N \cdot m$ までトルクが減少することによって、発電機の回転が徐々に遅くなるためであると考えられる。

発電機の負荷として200Ω, 400Ω, 800Ωの抵抗を接続したときの結果について考える。抵抗値が200Ωの時は、出力電力は低く、発電の持続時間は長くなっており、一方で、抵抗値が800Ωの時は、出力電力は高く、持続時間は短くなっていることが確認できる。これは、発電機の出力端子間の抵抗が小さくなると、発電機に電流が流れやすくなり、発電機を回転させるために必要なトルクが増加するためであると考えられる。また発電量は、抵抗値が200Ωのときに最も大きく、800Ωのときに最も小さくなっている。発条バネに蓄えられるエネルギーは一定であるため、負荷の抵抗値が小さい時がエネルギーの損失が小さく、負荷の抵抗値が大きい時がエネルギーの損失が大きいことを示している。

これは、抵抗値が大きいときは高い回転数で発電機が回転するため、低速回転時に比べ、歯車間の摩擦や、歯車のかみ合い不良に伴う振動などによる損失が大きく影響し、総発電量の減少につながったと考えられる。

すべての実験を通して測定値が波打っており、出力がやや不安定になっている。これは、発電機の回転が低速回転であったためであると考えられる。また、今回の実験で得られた発電機の出力電力の値は、最大でも0.2W程度と小さなものだったが、発電量は200Ω負荷のときに186Jであったことから、ほぼ設計値(192J)通りの結果を得た。

3-3 実証試験

蓄エネルギー・発電部(写真1)によって、実際に電力を得られることが分かったので、建設した浮体部(写真2)に組み込んで、実証実験を行う。実証実験では、発電した電力は、LED点灯で消費する予定である。LEDはドライバーを使用することになり、20回転の巻き上げで23分間の点灯を確認している。しかしながら、6時間巻き上げて、20分間の点灯では非常に短い。そこで、点滅させるなどの工夫によって、夜中の危険灯として、あるいは浮体を数を増やして、バッテリーと組み合わせて常夜灯としての設置を計画している。

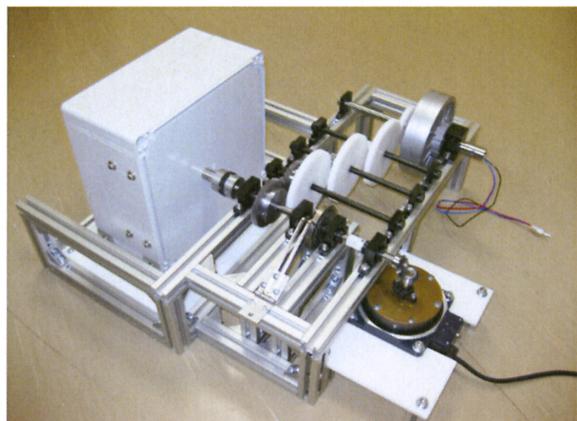


写真1 実際に製作した蓄エネルギー・発電部



写真2 実際に建設した浮体部

5. おわりに

干満差の小さな日本では、ほとんど注目されていない潮汐発電について、海面の上昇下降運動を、ボールねじ機構を用いて回転運動に変え、その回転を利用して巻き上げた発条バネを短時間に解放するという独自の提案により、干満差の小さな場所でも、潮汐エネルギーから電気エネルギーを取り出すことが可能な発電装置の開発を行った。

製作した潮汐発電装置は、発条バネの巻上げと解放の切り替えを、遊星歯車機構を利用して行い、発条バネの軸の回転を約60倍に増速して発電機に伝達することで、最大0.2Wの電力を取り出せる装置である。本発電装置では直接LEDライト等を接続しても点灯させるだけの電力は出力されていないが、LEDドライバと共にLEDライトを接続することにより、20分以上のLEDライトを点灯させることが可能である。よって、発条バネに蓄えたエネルギーを利用して、発電可能であることが確認された。

実際に本システムを設置する際には、出力電力をさらに大きくし、発電の持続時間を長くする必要がある。また、塩害による腐食対策や海洋生物付着に対する対策も十分に考慮する必要がある。

謝辞: 本研究を推進するにあたり、NPO法人佐世保市海洋スポーツ協会様および福田外科病院福田俊郎院長から研究資金の一部をご提供をいただきました。また、(株)ジャパンアクアテック様から、浮体部の製作協力及び製作場所のご提供をいただきました。未来創造研究会の皆さまには、開発に関します多数のご助言をいただきました。

この場をお借りしまして、お礼申し上げます。

尚、本開発は「潮汐利用発電装置」として2013年11月20日に特許出願した(特願2013-240162, 特開2014-122615)。

参考文献

- 1) 経済産業省, エネルギー白書 (2004)
- 2) 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(2013)
- 3) 経済産業省・資源エネルギー庁, エネルギー白書2012 (2013)
- 4) 産経新聞, 長崎・五島沖に巨大風力発電機、「浮体式」の洋上型で実証運転, 2013年10月23日
- 5) 環境省, 平成26年版 環境・循環型社会・生物多様性白書 (2014)
- 6) 薩摩川内市・商工観光部・次世代エネルギー課, 薩摩川内市新エネルギービジョン(基礎調査編)報告(2012)
- 7) Nova Scotia POWER website (<https://www.nspower.ca/>)
- 8) K-water website (<http://english.kwater.or.kr/>)
- 9) ばね技術研究会編, ばね 第2版, 丸善出版(1970)

A Proposal of renewable energy generator using tidal

Toshinobu Shigematsu, Hideki Shimada* and Bunji Ono**

*Department of Applied Chemistry and Biotechnology, Faculty of Engineering,
Okayama University of Science,*

1-1 Ridai-cho, Kita-ku, Okayama 700-0005, Japan

**Department of Control Engineering, Natinal Institute of Technology, Sasebo College,*

1-1 Okishin-cho, Sesebo, Nagasaki 857-1193, Japan

*** Faculty of Culture and Education, Saga University, 1 Honjyo-cho, Saga, 840-8502, Japan*

(Received October 30, 2017; accepted December 4, 2017)

In small tide, the system that can generate tidal power is proposed. General tidal power generation needs the tide difference of several tens of meters and a vast reservoir of a few kilometers square meters. And, these power plants are large-scale facilities with a giga wattle class of total power generation per year. In Japan, the tide difference is small. So, we have developed a tidal power system that does not require vast facilities and does not need a big tide difference. The key point of this development is how to extract energy from the tide which is filled with 0.1 mm per second. Thought of the following as the idea. The vertical movement of the tide was changed to the rotational motion by the float and the ball screw, and the spring accumulate the rotatinal energy. The tidal generator developed was $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m} \times 5\text{ m}$ in size. The energy that was able to accumulate was 187 J. This value is about the same as the design one (the design value is 192 J).

Thus, we demonstrated that it is possible to accumulate tidal energy and use that energy to generate electricity.

Keywords: Renewable energy, Tidal, Spring.