T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	波力を利用した小型密閉型発電装置
Title	A compact float type wave power generator
著者(和文)	木村仁, 鈴村紘司, 西中大作, 小関 道彦, 伊能 教
Authors	Hitoshi KIMURA, Daisaku NISHINAKA, Daisaku NISHINAKA, Michihiko KOSEKI, Norio INOU
出典 / Citation	第26回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2008, 9
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は日本ロボット学会に帰属します。 Copyright (c) 2008 The Robotics Society of Japan.

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

波力を利用した小型密閉型発電装置

○木村仁（東工大）　鈴村紘司（東工大）　西中大作（全日空）
小関道彦（東工大）　伊能教夫（東工大）

A compact float type wave power generator

*Hitoshi KIMURA (Tokyo Tech), Koji SUZUMURA (Tokyo Tech), Daisaku NISHINAKA (ANA),
Michihiko KOSEKI (Tokyo Tech), Norio INOU (Tokyo Tech)

Abstract— Conventional battery powered marine devices have problem on the activity time. From this viewpoint, compact wave power generator is expected to solve this problem. This study proposes a compact float type wave power generator. The generator uses resonance vibration of sea wave with spring supported mechanism. Optimized design is discussed from the simulation result of mathematical model. A prototype showed average power of 0.01W with 400mm height wave on Tokyo Bay.

Key Words: Wave power generator, Compact generator, Marine robot

1.　はじめに

近年は海洋調査などにも移動ロボット [1] が多く使われるようになってきているが，これらロボットを利用した海底地形の探査や海洋生物の生態調査などでは，目的によって長時間，長距離の移動が必要となる場合もある．しかし現時点では海洋調査ロボットは母船から電源ケーブルを牽引するか，バッテリ駆動で短時間の移動を行うため，長時間あるいは長距離の自律航行を行うことは困難であると言える．[2]．もし周辺環境に無限と言って良いほど存在する波浪エネルギーを電力に変換できれば，これらのロボットや海洋調査デバイスの用途が大きく広がることが期待できる．太陽光発電を利用することも考えられるが，天候や時刻によって著しく発電量が変化する上に揺れる海面上でうまく姿勢を維持する必要がある．

波力を利用した発電についての研究は以前から行われているが，その主たるものは発電所用途のような大型で一箇所に据え置かれるものが多い [3]．また，比較的小型なものでも既存の装置は大きさが数 m から数十 m であり [4]，海洋調査ロボットなどが牽引する目的に適しているとは言いがたい．もしロボットに搭載可能な程度のサイズで波力を利用した発電機構が実現できれば，長期間に長距離を移動するような調査ロボットが期待できる．あるいは多数の調査機を散布して広範囲の海洋を長期間に渡って調査するような手法の実現可能性も考えられる．本論文ではこのような小型の波力発電機構について議論する．また，試作した発電機構を用いた海洋での発電実験の結果についても報告する．

2.　発電方式

波のエネルギーを利用する方法はいくつかあるが，既存の海洋発電設備は図 1 に示されるような空気室とタービンを用いた形式や，大型の浮体を利用して潮位の変化を利用する形式 [5] などが多い．しかし，このような方式は海水による汚染に対する清掃や，部品の交換等の定期的なメンテナンスが必要不可欠であり，メンテナンスフリーであることが望ましい自律航行型の海洋ロボットや探査モジュール等には適さない．そこで本研究では小型な波力発電機構として浮体を用いた方式を提案する．浮体を利用する発電方法として図 2 に示すような二つの方式を比較した場合，図 2(b) の方式はシール部分におけるワイヤの摺動回数が多いため，図 2(a) に示す一体型の方がメンテナンス性に優れると予想されるので，本研究では図 2(a) の方式を採用することとした．浮遊型の海洋発電機としてはマイティホエール (最大長さ 50m, 重量 4380t)[6] やジャイロ式発電機 (最大長さ 11m, 重量 11t)[7] なども存在するが，これらは小型装置に搭載して長期間メンテナンスフリーで使用するような用途には適さないと考えられる．

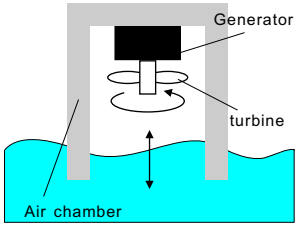
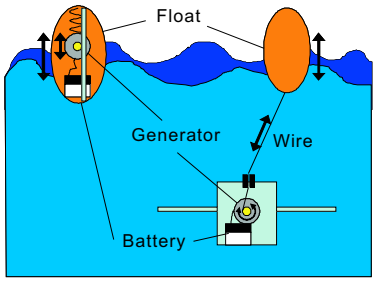


Fig.1 Conventional wave power generator



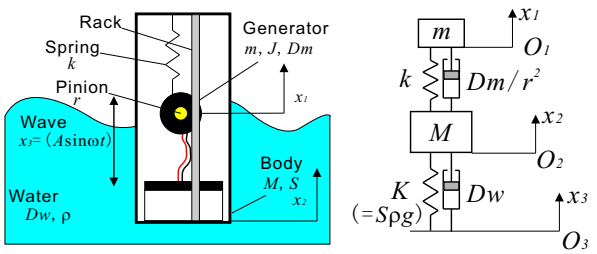
(a) all-in-one　　(b) separate type

Fig.2 Compact wave power generator system

3. 最適設計のための発電シミュレーション

3·1 システムの運動方程式

図 3 に提案する発電機構の概略を示す．図における x_1 は振動子の変位，x_2 は筐体（浮体）の変位，x_3 は波の表面の変位である．また，M は筐体の質量，m は発電機も含めた振動子部分の質量，J は回転子の慣性モーメント，D_m は発電機の回転に対する粘性抵抗，S は機構の断面積，ρ は水の密度，g は重力加速度，D_w は水の粘性抵抗である．本機構は図 3(a) に示されるように密閉された浮遊体の中に発電機を搭載した振動子が吊るされており，波による上下方向の運動がラックを介して発電機の回転運動に変換される．この系において浮体の受ける浮力が波に対する上下方向の変位に比例して働くと考えた場合，浮力はばね定数が $K(=S\rho g)$ であるばねと同様に扱える．この場合本機構は図 3(b) に示されるような二つのばね，ダンパ系が直列に接続された系とみなすことができる．



(a) schematic diagram of the generator (b) mechanical model

Fig.3 Mechanical model of proposed system

効率良い発電を行うためには振動子である発電機部分が共振あるいはそれに近い状態になることが望ましいが，この系はばねだけで構成される 2 自由度振動系と異なり粘性項を含むので振動子部分の共振周波数は入力，つまり波の周波数に依存してしまう．そこでターゲットとなる波の周波数および振幅はある程度限定し，その条件下において効率の良い設計パラメータを設定する必要がある．本研究では実機の試作を行う前に系の運動方程式からシステムの適当な設計パラメータを得ることを試みた．本機構の運動方程式はモータの摩擦や水の粘性があるため，非保存力による一般化力 Q'_i を含んだ以下のラグランジュ方程式で記述される．

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial x_i} = Q'_i \tag{1}$$

このときラグランジアン L は以下の式で示される．

$$\begin{aligned} L &= T - U \\ &= \frac{1}{2}\left\{m\left(\dot{x_1}^2 + \dot{x_2}^2\right) + J\dot{\theta}^2 + M\dot{x_2}^2\right\} \\ &\quad - \frac{1}{2}\left\{kx_1^2 + S\rho g\left(x_3 - x_2\right)^2\right\} \end{aligned} \tag{2}$$

ただし，$\theta(=x_1/r)$ はモータの回転角である．一般化力 Q'_i は $Q'_i = -\partial R/\partial \dot{x}_i$ で示される．このとき R は散逸関数であり次式で示される．

$$R = \frac{1}{2}\left\{D_w(\dot{x}_2 - \dot{x}_3)^2 + D_m\left(\frac{\dot{x}_1}{r}\right)^2\right\} \tag{3}$$

また，波の変位 x_3 については簡単のため $x_3 = A\sin\omega t$ と仮定して，$i = 1, 2$ について式 (1) を計算すれば系の運動方程式は x_1，x_2 およびその微分項を含んだ以下の二式で示される．

$$\begin{aligned} &S\rho g(A\sin\omega t - x_2) - D_w(\dot{x}_2 - \omega A\cos\omega t) \\ &= m(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2) + M\ddot{x}_2 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\left(m + \frac{J}{r^2}\right)\ddot{x}_1 = -m\ddot{x}_2 - \frac{D_m}{r^2}\dot{x}_1 - kx_1 \tag{5}$$

これらの微分方程式について x_1，x_2 およびその微分項に境界条件を与え，4 次のルンゲ・クッタ法を用いて数値計算を行うことで各時刻における振動子および筐体部分の挙動の予測が可能である．また，発電システムの挙動から発電出力の見積もりも可能となる．永久磁石を用いた発電機について，出力電圧を E，出力電流を i とするとこれらは以下の式であらわされる。

$$E = K_E\dot{\theta} = K_E\frac{\dot{x}_1}{r}\ ,\ i = \frac{T}{K_T} \tag{6}$$

ただし K_E は誘起電圧定数，K_T はトルク定数であり，T は発電機に作用するトルクである．また，発電時に減速機を利用する場合には式 (6) において減速比を乗算する必要がある．また，発電機に作用するトルク T は下式を用いた．

$$T = \frac{J}{r}\ddot{x}_1 + D_m\frac{\dot{x}_1}{r} \tag{7}$$

式 (4)，(5) から得られる $\dot{x}_1$，$\ddot{x}_1$ を式 (6)，(7) に代入すれば発電機の出力電圧 E と出力電流 i が計算できる．

3·2 シミュレーション結果

全ての設計パラメータを自由に変化させてシステムの挙動を予測するのは計算コストがかかりすぎるため，本機構の設計においては要求仕様をある程度決定しておく必要がある．図 4 はある条件で入力として x_3 に 1Hz の正弦波を与えた場合の発電機の挙動の例である．

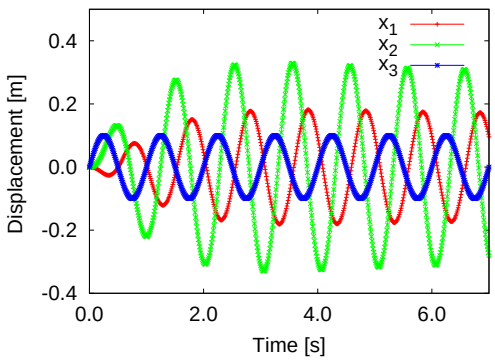


Fig.4 Simulation under constant m(=1.0kg).

本機構のような構造では，ある程度自由に設定できる設計パラメータとして振動子の質量 m，筐体の質量 M，筐体の断面積 S も含めた筐体の体積が挙げられる．また，周波数については波の周波数として想定される

0.5〜2.0Hz 程度の範囲で計算を行った．筐体の断面積 S を一定とし，m あるいは M だけを変化させて発電量を計算した結果を図 5 および図 6 に示す．いずれの結果も発電機全体の重量 $m+M$ に対して振動子の質量 m が大きい場合に高い発電出力が得られるという傾向を示している．この結果は筐体の重量を出来るだけ軽量にして振動子部分の重量を大きく取る設計が高効率であることを示唆するが，実際には筐体が軽過ぎると海面に対して筐体の姿勢が不安定になり，波の振動を有効に振動子の運動に変換できないことが予想される．この対策としては筐体下部になるべく重量を配分する，あるいはフィンを取り付けると言った方策が考えられるが，どちらも発電機の体積または重量が増加する．m と M は発電出力と動作の安定性についてトレードオフの関係にあると言える．

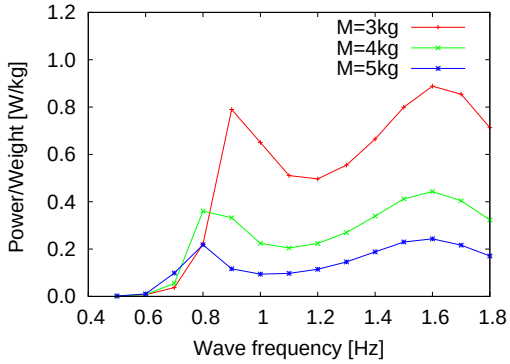


Fig.5 Simulation under constant m(=1.0kg).

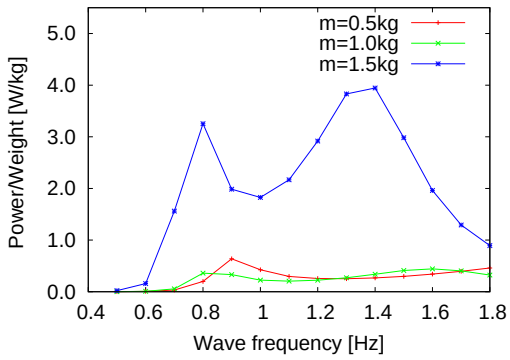


Fig.6 Simulation under constant M(=4kg).

図 7 は波の周波数を 1.0Hz の正弦波として，発電機全体の質量に対して m と M を変化させた場合の発電出力の計算結果である．m のみを増加させた場合でも，得られる発電力は総重量が 3kg 付近のときにピークを迎えている．これは m が増加すれば機構全体の重量も増加するためであり，定められた M の大きさに対して最適な m の値が存在することがわかる．

ここに示すような数値シミュレーションにおいては各パラメータはある程度自由に設定できるが，実際に機構の共振周波数をこのような低い周波数領域に設定するためには振動子を吊るすばねのばね定数 k を極めて小さい値にする必要がある．しかし，振動子の重量

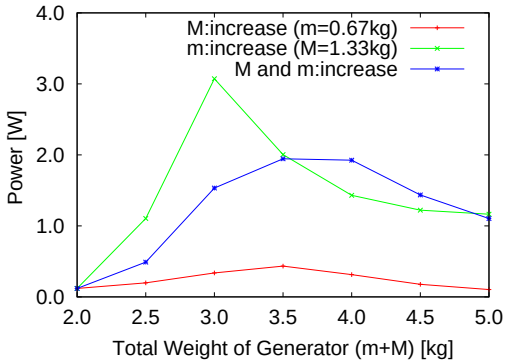


Fig.7 Power dependency on m and M. under 1.0Hz

をばねの弾性変形領域で支えるためにはある程度 k を大きくしなければならない．本研究では振動子の重量を定荷重ばねで支えることも検討したが，摩擦による誤差が k に対してかなり大きくなってしまうためこの方法は実現には至っていない．本研究では海洋で実験を行なう際には筐体の下部重量を大きくして，なるべく浮体が直立した姿勢を保てるような工夫を行なっている．

4. 実験および結果

本研究では小型であまり大きな電力を必要としない用途を想定しているので，海洋調査デバイス（加速度センサ，温度センサ，発信機等）や小型の探査ロボットのバッテリーを充電できる程度の出力を目標としている．はじめに実験室で実験可能なサイズの小型な試作機 1 によって発電実験を行うこととした．図 8 に試作機 1 の概観を示す．本機は 2 機の DC モータを発電機として用いており，120 × 120 × 250mm の直方体でばね定数 k が 160(80 × 2)N/m，振動子 m が 0.7kg，筐体 M が 1.3kg である．

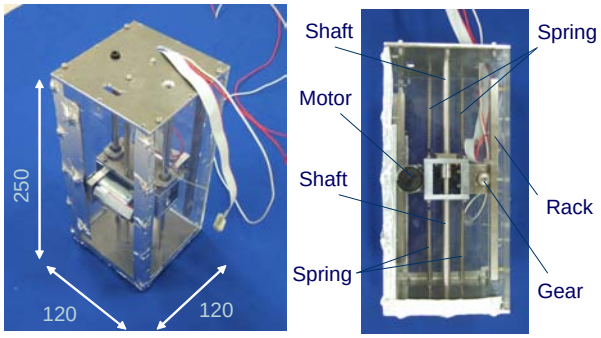
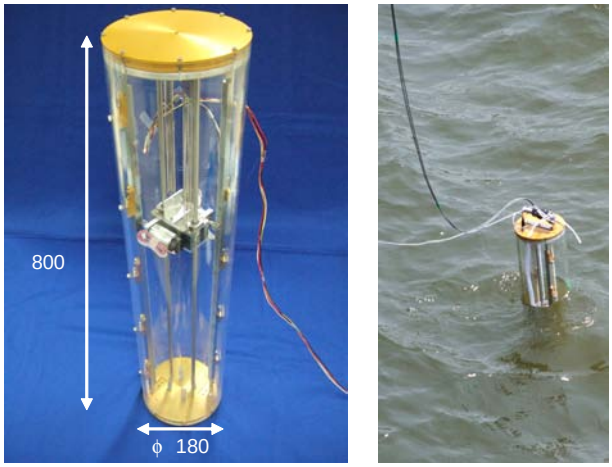


Fig.8 Overview of Prototype1

予備実験として試作機 1 をバケツの中に浮かべ，上端をワイヤで吊るしてモータとクランクを利用して加振することで発電量の測定を行った．振幅 0.07m，振動数 1.5Hz という条件において，最大発電量は 0.44W(0.22W × 2)，効率は 11%であった．この結果は海面上で試作機 1 と同じ面積を利用して最高の方向を維持した場合の太陽光発電の計算値である約 0.2W[8] を上回っている．試作機 1 は太陽電池と比較すると厚

さ方向が大きく立体的な構造であり，単純な比較は難しいものの提案手法の実用化の可能性はあると考えられる．

提案機構で発電可能であることが確認できたので，実際の海洋上で発電実験を行なうこととした．しかし試作機 1 は海上で使用するには密閉性が低いことと，筐体の大きさが小さいために大きな振幅で加振した際に振動子が筐体の上下の面に衝突してしまう現象が見られた．そこで海洋実験用に密閉性が高くやや大型の筐体を持つ試作機 2 を作成した．図 9 に試作機の概観と海洋実験の様子を示す．



(a) Overview of prototype2 (b) Experiment on sea

Fig.9 Prototype2

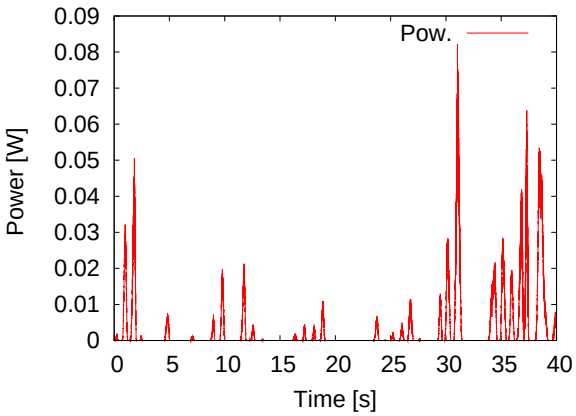


Fig.10 Experimental result of prototype2 on Tokyo sea

試作機 2 は外径 180mm 高さ 812mm の円筒形で，長さがとれるため k を 25(12.5 × 2)N/m と低い値に設定できた．また，m は 0.7kg，M は 8.9kg である．これに加えて姿勢安定化のために筐体の底面内部に 2kg，底面外部に約 4kg の重りを取り付けた．実際に東京湾の洋上に試作機 2 を浮かべて発電実験を行った．このときの波高は平均約 0.4m 程度であり，波の周波数は約 0.5Hz 程度であった．得られた発電出力結果を図 10 に示す．最大出力電圧は 8.8V で，最大電流は 9.3mA であった．また，発電出力の平均値は約 0.01W であった．実験時の波が小さかったとはいえ，現在の本機の出力ではまだ小型のバッテリを充電する用途にも十分とは言えない．今後は機構の見直しを行ってサイズの最適化および発電出力の向上を目指す予定である．

5. 結論と今後の課題

従来あまり注目されていなかった小型の波浪エネルギー発電装置について提案を行った．運動方程式からシステムの挙動を予測することで要求仕様に対応する最適化パラメータの設定指針を示した．また，二つの試作機を作成し，海上での発電実験を行なった．直径 180mm 高さ 800mm の円筒形の試作機による海洋実験においては約 0.4m の波高において平均 0.01W 程度の出力を得た．

本研究で提案するような発電装置自体が浮体となる波力発電においては，波力の機械的エネルギーをいかに発電機を動作させる方向に利用できるかが高い効率を得るための大きなポイントとなる．自由に浮遊している発電装置は 6 自由度で運動するため，波によって生じる浮体の運動をどう効率よく発電機の運動に変換するかが今後の課題である．

[1] 浦, 高川:“海中ロボット”, 成山堂書店, 1997
[2] 浦:“海中に求められるロボット”, 日本ロボット学会誌, Vol22, No.6, pp.692-696, 2004.
[3] 上原:“海洋エネルギー”, 日本機械学会誌, Vol.93, No.860, pp.560-566, 1990
[4] 緒方輝久:“波力発電の現状と将来”, エネルギー・資源,Vol.23, No.2, pp.50-54, 2002
[5] 羽田野, 渡邉, 松浦, 中野:“つるべ式波力エネルギー変換に関する研究”, 海洋エネルギーシンポジウム 2006, pp.29-32, 2006
[6] 鷲尾, 大澤, 緒方, 中川, 岡山, 永田:“沖合浮体式波力装置「マイティホエール」の発電出力”, 日本造船学会誌 No.863, p.12, 2001
[7] 神吉, 森本, 川西, 大西, 畑:“ジャイロ効果を用いた波力発電システム”, 日本機械学会 関西支部講演会講演論文集 Vol.2004, No.79, pp.”6-11”-”6-12”, 2004
[8] 太陽光発電協会:“太陽光発電システムの設計と施工改訂 3 版”, オーム社, 2006