

シャフト型リニアモータを用いた波力発電に関する基礎的研究

五明美智男*・堀沢真人**

水面上の浮体の運動を波動ポンプで増幅し, その運動をシャフト型リニアモータで電気エネルギーに変換する新たな波力発電方法について, 水理実験により検討した. 波動ポンプの基本的特性は, 水面変動の増幅および駆動部の防護効果であり, 浮体・モータを一体とすることにより運動エネルギーを簡易な機構で電気エネルギーに変換することができる. 一方, シャフトモータによる発電に伴い, 浮体には電気的な抵抗力が働き, 波動ポンプの増幅効果が低減される. 今後の実用化のためには, 発電効率の把握とともに抵抗力を取り込んだ浮体の設計法の確立が望まれる.

1. はじめに

地球温暖化対策として, 風力発電をはじめとした自然エネルギーの利用研究, 実用化が積極的に進められている. その1つである波力発電については, 現在までに多くの研究が実施されているものの, 実用化および今後の普及のためには解決すべき課題が少なくない. 既往の発電方法は, 波エネルギーの一次変換の方法により, 空気エネルギー変換方式, 機械的エネルギー変換方式, 水の位置エネルギーまたは水流エネルギー変換方式の3つに大別されるが, 特にこれらに共通する課題としてコストの高さと施設の耐波浪安全性が指摘される.

本研究で取り上げる方法は, シャフト型リニアモータによって浮体の鉛直往復運動を電気エネルギーに変換し整流するものである. 水面上の可動物体の運動エネルギーを対象とした基本的な方法であるが, 電気エネルギーの変換方法に新たな手段を導入している点が従来のものとは異なる. また, 可動部ならびに固定部の構造強度の確保を同時に図ることが可能な発電方式でもある. 本報では, その実用化のための第一段階として, 基本的なシステムの性能ならびに波浪応答について, 水理実験により検討した結果を報告する.

2. システムの概要と開発上の課題

シャフト型リニアモータ (以下モータ) は, N 極, S 極を筒状に順次配置したシャフトとコイル巻部のスライダ (写真-1) より構成され, ファクトリーオートメーションの位置決定等に使用されている. 本研究では, 水面をはさんで垂直に固定した両端開放の円筒内に設置した浮体上部にシャフトの端部を連結し, スライダ部を固定して発電機として適用する (図-1). このとき, シャフトは浮体と一体となって運動するものとする. 以下, システムの構成要素についての既往の理論およびシ

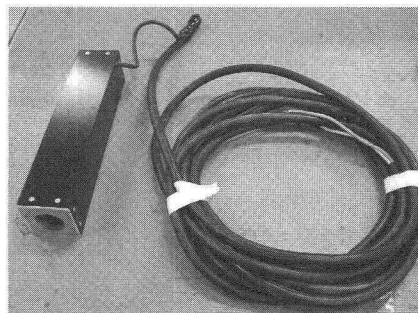


写真-1 スライダー

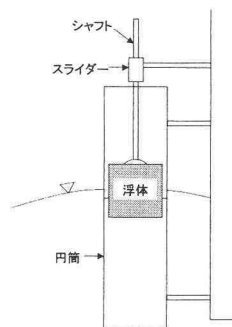


図-1 システム概念図

ステム化に際しての基本的な課題を整理し, 3. 以降で実験により検討を加えている.

(1) 波動ポンプおよびポンプ内浮体

波の場に置かれた円筒内部の水塊は, 波動ポンプ機能によって, 周波数に依存した運動特性を示すことが知られている (木村, 1974). 管内運動の固有周期は (1) 式によって計算され, 固有周期近傍の入射波作用下では円筒外部の水面変動に対し円筒内水位変動の増幅が期待できる.

$$T_0 = 2\pi\sqrt{l/g} \dots\dots\dots (1)$$

ここに, g : 重力加速度, l : 円筒の没水長である.

特に, 適切な喫水と浮力を持たせることで, モータの

* 正会員 博(工) 東亜建設工業(株)技術研究開発センター
** 正会員 東亜建設工業(株)土木営業本部

シャフトを支持する浮体もほぼ同様の挙動を示す。そのため、波動ポンプとしては、外力に対する円筒および既設構造物への固定部分の耐波性はもちろんのこと、浮体運動をシャフト運動に効率よく伝達するための機構を工夫する必要がある。

(2) モーター

浮体の運動がシャフトの鉛直運動に等価に変換される場合、モータの発生電圧、電力は基本的には以下の2式で評価される。

$$v = V_i w \cdot \sin(2\pi f' t) \dots\dots\dots (2)$$

$$W = vI = v^2/Z \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 v : 電圧、 V_i : 逆起電力定数、 w : 浮体鉛直速度、 t : 時間、 f' : モーター周波数、 W : 電力、 I : 電流、 Z : インピーダンスである。すなわち、発生電力は、浮体鉛直速度の二乗、逆起電力定数の二乗、インピーダンスの逆数に依存する。モータの適用に際し、こうした評価方法の妥当性や想定するシステムでの適用性について確認する必要がある。

(3) 浮体・モータ系

浮体の上下運動によるシャフトの運動に伴い電気的な抵抗力が発生する。その大きさは、推力定数 K_f と電流 I の積によって、(4) 式で与えられる。

$$K_f V_i w \cdot \sin(2\pi f' t)/Z \dots\dots\dots (4)$$

したがって、発生電流に比例する外力の作用により、モータの有無によって異なった応答特性を示すことになり、その把握も重要である。

(4) 発電量と効率

式(2)、(3)にもとづけば、理論上は非常に大きな出力を期待できることとなるが、波浪の発生頻度を考慮した固有周期の設定や機械的な伝達ロスなどともに、モータの仕様、交流から直流への整流時の電気的なロスなどについても考慮する必要がある。そのため、小規模ながらも実際に本システムを用いた発電を試み、発電量と効率の特性を把握してシステムの改善を図るとともに、実用化に向けてモータ改良の可能性について検討する必要がある。

3. 波動ポンプおよび内部の浮体運動の特性

波動ポンプの基本特性把握のための水理実験は、長さ50 m、幅1 m、高さ1.2 mの2次元造波水路において水深を0.8 m 一様に設定し、直径30 cm、長さ1 mの円筒を没水長30 cm または50 cm で設置して行った。

浮体については、モータのシャフト重量5 kg と同等の円柱棒(磁石なし)を上部に設置し、喫水13 cm の条

件で浮体・シャフト系とした。機構的に2つの工夫を施し、第一に、発泡スチロール製の円柱(直径25 cm、高さ30 cm)の周囲にローラーを取り付け、円筒内管壁との接触、摩擦を軽減し、円筒内部での滑らかな運動を確保した。第二に、浮体とシャフト下部の連結点には、ボールローラーを取り付け浮体の傾きがシャフトの鉛直運動を妨げないようにした。実験は、この浮体・シャフト系の有無に対して、波高5 cm~20 cm、周期1~3秒の規則波を作用させ、管内および管外の水位変動、浮体の運動などを計測した(図-2)。

図-3、4は、それぞれ浮体・シャフト系の有無による没水長50 cm 条件での振幅増幅率、位相差を示したものである。

固有周期 T_0 と波浪の周期 T が一致する場合、最大で2.5~3.0倍程度の管内水面あるいは浮体・シャフト系の運動振幅の増大が確認された。シャフト重量の付加により、浮体・シャフト系では、 $T/T_0 > 1$ で若干増幅率が小さくなる。また、位相差は、 $T/T_0 = 1.4$ 前後で最小となる。

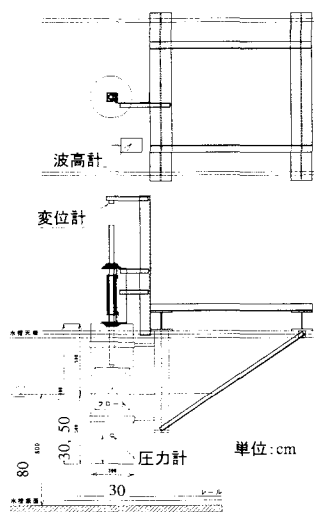


図-2 波動ポンプおよび内部浮体の運動計測

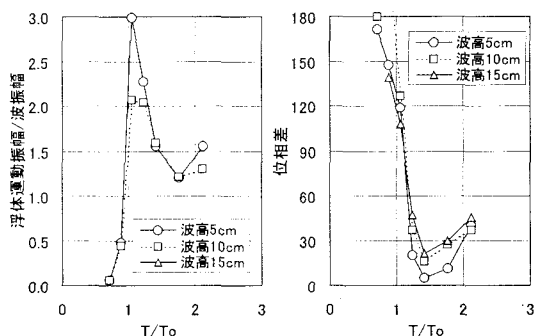


図-3 円筒内水位運動と波浪の振幅比、位相差 ($l=50$ cm)

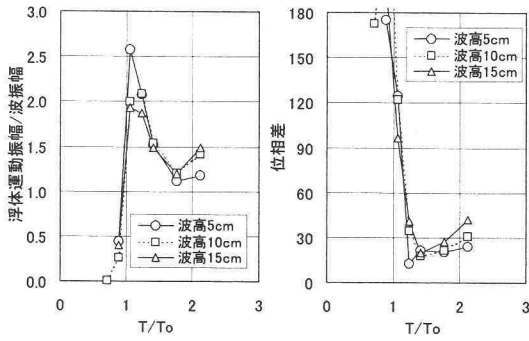


図-4 円筒内浮体シャフト系運動と波浪の振幅比，位相差 ($l=50\text{ cm}$)

っている。こうした傾向は，没水長30 cmでも同様である。

今回用いている円筒構造は，以上の機能に加え，シャフト，スライダおよび浮体を円筒に覆い，駆動部の波力対策機能をあわせ持つものであり，波運動をシャフトの往復運動に変換する機構として有効な装置と考えられる。

4. モータの基本的性能の評価

(1) 実効値による評価

(2)で記述する波浪水槽での発電実験に先立ち，モータのシャフト部を一定速度で動作可能な単軸ロボットに取り付けた実験を行い，定速走行させたスライダから三相交流として取り出した線間電圧を計測した(図-5)。モータとしては，推力定数87 N/A，逆起電力定数29 V/m/s，電気抵抗18 Ω ，インダクタンス25 mH，スライダ可動部延長1.0 m，磁極ピッチ6 cmの小型のものを使用した。

三相交流の線間電圧の理論値 v_{cal} は，逆起電力係数を用いた(2)式を使い(5)式により，計測された線間電圧の実効値 v_{mes} は(6)式で与えられる。

$$v_{cal} = \sqrt{3} V_l w \dots\dots\dots (5)$$

$$v_{mes} = v_{max} / \sqrt{2} \dots\dots\dots (6)$$

表-1は，速さ0.1, 0.3 m/sの2種類の速度に対する線間電圧の理論値 v_{cal} および計測最大値 v_{max} ，実効値 v_{mes} を示したものであり，理論値と計測値は良く一致している。

(2) システムでの適用性

図-6は，モータからの三相交流の出力部に整流装置と可変抵抗を接続した回路図を示したものである。実際の波浪作用時の発電状況でのモータの評価を行うために，図-2の装置に浮体とモータを一体化させた浮体・モータ系を設置し，波動ポンプと同様の条件で波を作用させて発電実験を行った(写真-2)。

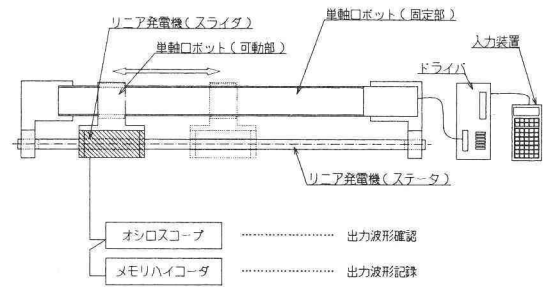


図-5 単軸ロボットを用いた性能確認実験

表-1 定速走行実験における理論値と計測値の比較

	$v_{cal}(\text{V})$	$v_{mes}(\text{V})$	$v_{mes}(\text{V})$
$w=0.1\text{ m/s}$	5.0	7.0	4.9
$w=0.3\text{ m/s}$	15.1	20.3	14.4

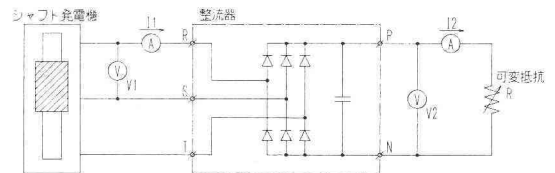


図-6 発電・整流回路図

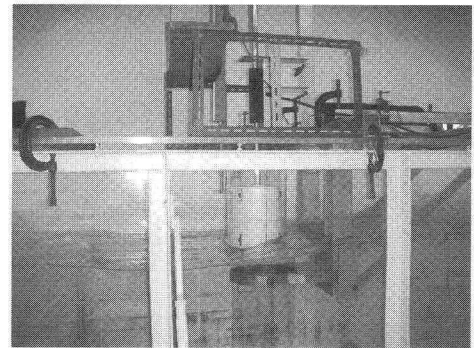


写真-2 発電実験状況

タ系を設置し，波動ポンプと同様の条件で波を作用させて発電実験を行った(写真-2)。

図-7, 8は，可変抵抗値をそれぞれ20 Ω ，100 Ω 一定とし，波高4 cm，周期1.5 sの規則波を作用させた時の浮体・モータ系の変位，鉛直速度および線間電圧の理論値，計測値および単相電力の理論値，計測値を示したものである。なお，式(2)中のモータ周波数は，正弦波交流を参考に(7)式で求めている。

$$f' = (2a/p) \cdot f \dots\dots\dots (7)$$

ここで， a ：浮体変位の振幅， p ：磁極ピッチ， f ：波の

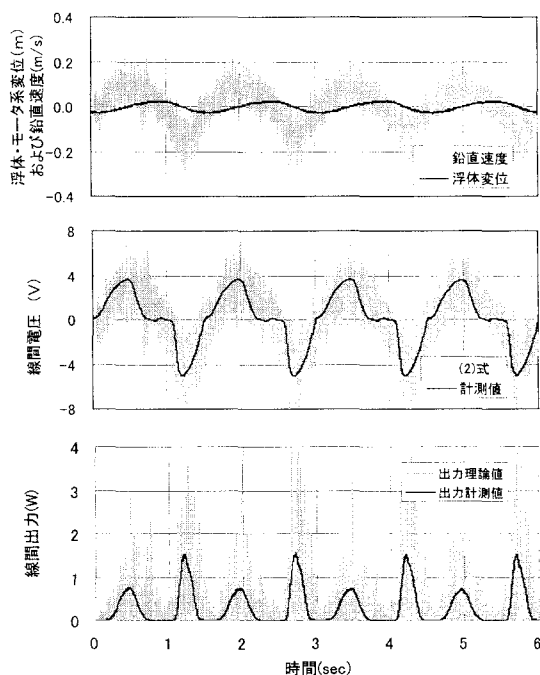


図-7 発電時の浮体の運動および発生線間電圧、電力の理論値と計測値の比較 (20Ω)

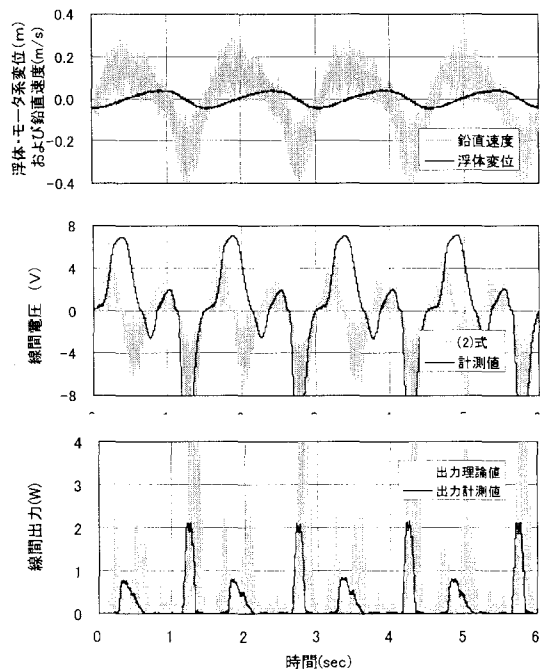


図-8 発電時の浮体の運動および発生線間電圧、電力の理論値と計測値の比較 (100Ω)

周波数である。特に、本研究で扱ったモータの場合には、円運動ではなく一方向での往復運動となることから、(2a/p) の整数値を用いて平均的なモータ周波数とした。

図-7は、モータの周波数が入射波の周波数と一致する条件に相当し、電圧、電力ともに理論値と計測値は良く一致していることがわかる。一方、図-8においてはモータ周波数が入射波周波数の2倍の条件になるが、N極とS極の境界を通過する時間間隔が不均等となり、理論値と計測値の波形にずれが生じている。以上より、式(2)、(3)は、平均的には妥当と考えられるが、磁極ピッチに対してシャフトの移動量が大きくなる場合には、モータ周波数の与え方も含め若干の改良が必要と考えられる。

5. 浮体・モータ系の応答特性

実験で用いた回路の2次側には可変抵抗が接続されており、その制御によって回路のインピーダンスを変えることが可能である。

図-9は、波動ポンプの固有周期にほぼ一致する周期1.5秒、波高15cmの規則波を継続して作用させている間に、抵抗値を25Ωから500Ωまで段階的に変えた場合の水位変動、浮体変動を示したものである。時間の経過すなわち抵抗値の増加にしたがって、水位変動に対する浮体・モータ系の応答が大きくなる現象が確認される。これは、抵抗値の増加によって回路全体のインピーダンスが高くなり、電力の消費および電流の変化によって、1次側の電気的な抵抗値が減少したためである。

このとき、各抵抗値における振幅比は、表-2に示すような値となっており、浮体・シャフト系の振幅比1.9(図-4)と比べ非常に小さくなっている。

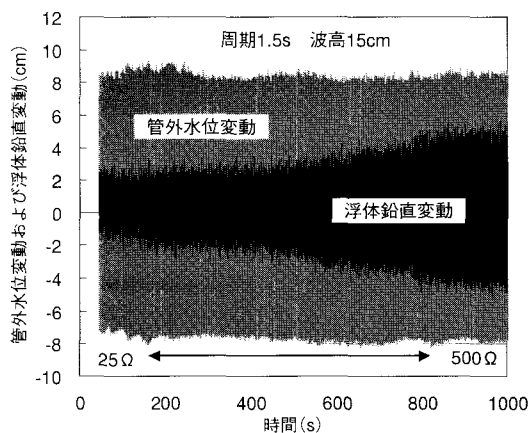


図-9 管外水位変動と浮体・モータ系鉛直変動と2次側負荷の抵抗値との関係

表-2 各抵抗値における振幅比

抵抗(Ω)	10	20	30	40	60
振幅比	0.26	0.29	0.31	0.35	0.40
抵抗(Ω)	80	100	200	300	400
振幅比	0.43	0.46	0.53	0.53	0.58

6. 本システムの発電効率と実用化に向けての課題

今回実施した実験では、発生電圧が小さいものの整流器によって直流化されることが確認された。さらには発電効率を定量的に把握すること重要であるが、浮体・モータ系での発電実験時の発生電流が数10 mA と非常に小さいことから、電流測定の前度の制約で発電効率については言及することが困難である。そこで、ここでは、本研究をとおして得られた実用化に向けての課題について整理することにする。

(1) 基礎式による考察

今回の実験では、通常FA（ファクトリーオートメーション）用の位置決めモータとして使用されるモータを発電機として転用実験を行った。次に示す仕様の中で、発電性能として重要となるのは、

①逆起電力定数

②内部抵抗（電気抵抗・インダクタンス）

の2項目である。すなわち、(2)、(3)式に示した基本式より、内部抵抗が低いほど、逆起電力定数が大きいほど、あるいはインピーダンスが小さいほど高い電圧が得られることがわかる。本システムの実用化にあたり高出力のシステムとするためには、電気的な抵抗力を考慮した浮体およびモータの設計手法を確立するとともに、整流器も含めたシステム全体のインピーダンスの最適化について検討する必要がある。

(2) モータの改良

用いたモータは内部抵抗が18 Ω と高いことから、わずかな電力しか得られていない。しかしながら、一般の発電機の内部抵抗が数 Ω 以下であることを考慮すれば、シャフトモータの内部抵抗を数 Ω 以下とし、逆起電力の高いものとすることで高出力の発電機が理論上は製作

可能と考えられる。しかしながら、逆起電力定数と内部抵抗には相反する性質がある。発電機の巻き線を例にとると、逆起電力を上げるため巻き線数を多くすれば内部抵抗が高くなる（抵抗の長さに比例）。この対処として巻き線を断面積の大きいものへ変更する、または鉄心形状を工夫するなどして高出力な発電機を設計することが必要となる。

(3) 浮体の設計

推力定数は波の上下運動を浮体の上下運動に変える上での抵抗（拘束力）として作用するものであり、浮体の上下動振幅を低下させ、その結果発生電圧の低下につながるものである。高出力型の発電機を設計した場合には、発生電流が高くなるため推力定数による拘束力はさらに増大するものと考えられることから、推力定数および抵抗を考慮した浮体の設計法を確立する必要がある。

7. おわりに

新たな発電方式としてシャフトモータを用いた波力発電の基礎的な実験結果について報告した。今回の研究では、発電現象の確認と問題点の整理に主眼を置いたため、基本的な特性の把握にとどまった。今後は、発電効率の定量的な把握と(4)式の電気抵抗力を考慮した浮体設計および発電機としてのシャフトモータの改良が、実用化に向けての大きな課題である。

謝辞：本研究の実施にあたり、(株)トーメン産業プロジェクト部の関口、松井の両氏より貴重な助言をいただくとともに、(株)ジーエムシーヒルストーン石山氏よりシャフトモータを提供していただきモータについてのご教示をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 木村晴保(1974)：水面に固定された管内の水塊の振動特性，農業土木試験場報告，第12号，pp. 143-154.
- 高橋寛，増田英二（2003）：わかりやすい電気基礎，コロナ社，p. 321.
- 山田一(1990)：リニアモータと応用技術，実教出版，p. 136.