トルクフィードバック方式による変動動力の一測定法[†]

——波浪エネルギー変換器のエネルギー変換効率の計測——

川谷 亮治*・桜井 努**・増淵 正美*

A Method for Measuring Fluctuating Power by the Principle of Torque Feedback—Measurement of the Energy Converting Efficiency of a Wave Energy Converter—

Ryoji KAWATANI*, Tsutomu SAKURAI** and Masami MASUBUCHI*

In this paper, a measuring method based upon the torque feedback principle is proposed for measuring the power of a rotating machinery turning forward and reverse directions periodically and is applied to measure the energy converting efficiency of a wave energy converter.

In the primary stage of a wave energy converter, it is often necessary to measure the converted power by using the linear or rotary motions which moving directions change at a very low frequency. when the power of walking motions of men and animals is desired to be measured, the same problem will be faced. In these cases, it is difficult to use the conventional power measuring method for the machines which rotate only in one direction.

A measuring instrument consisting of a tacho-generator which detects the angular velocity and a torque motor which generates the brake torque proportional to the output of the tacho-generator so as to give the brake torque to the movement of the converter is devised. As the result of the application of this measuring instrument to the wave energy converter consisting of 2 floating bodies and a connecting rod, it is found that this measuring instrument is very accurate. Moreover, it is also the special feature of this instrument that the optimum point of converting efficiency

can be obtained during operation since the brake torque generation can be controlled precisely from the outside of this system.

Key Words: ocean engineering, wave energy converter, energy converting efficiency, power measurement

1. はじめに

回転機器の動力計測には種々の方法があるが、一般にその機器に何らかの制動を加えてそこで消費された動力、つまり制動トルクと回転速度を計測して行う方法がとられる。その計測方法はトルク計測法により大別して(1)吸収動力計、(2)反動動力計、(3)伝達動力計に分類できる^{1),2)}。

本論文では、波浪エネルギー変換装置の動力計測が目的である。この場合、人間や動物の歩行運動にもみられる往復回転運動がその対象となる。そのため、回転角速度を検出、フィードバックして、外部トルクに対抗するトルクを瞬時々に発生させる方式をとれば、平均トルクも計測できるのみか、フィードバック量を変えることによって対抗トルク量も自由にかつ正確に変わるので、負荷変動による動力吸収状況の計測もできる特色をもつ。したがって、原理的には(2)の方法といえる。この方法は一般に測定対象のエネルギーは量が小さくても損失エネルギーが少なく、精度の高い測定ができる特長がある。

ところで、本測定法の対象となる波浪エネルギー変換装置は、海洋の波によって浮体を運動させて波浪エネルギーを運動エネルギーに変換(1次変換)し、さらに既知の方法によって利用できる形態のエネルギーとして取り出す(2次変換)装置であり^{3),4)}、波浪のもつエネルギーのうちどの位の割合が浮体の機械的エ

[†] 第22回計測自動制御学会学術講演会で発表(昭58・7)

* 大阪大学工学部 吹田市山田丘 2-1

** 松下電器産業(株) 門真市大字門真 1006

* Faculty of Engineering, Osaka University, Suita

** Matsushita Electric Industrial Co., Ltd., Kadoma

(Received December 15, 1983)

(Revised May 15, 1984)

エネルギーに変換されるかという1次変換効率が本研究の測定対象である。この場合、変換器への入射波の周波数は水槽実験にて1 Hz 前後(実海域では約0.1 Hz 以下)という低周波であるから、誤差を伴う増速装置やクラッチを用いない場合にはこの周波数で変動する入力をそのまま計測する必要がある。その上、水槽実験では入射するエネルギー量自体が非常に小さい。したがって、変換されたエネルギー量を測るにはエネルギー損失はできるだけ避けねばならないので、適切な制動力を加えるには、

1) 低速で大きな制動力を発生できること、2) 往復回転できること、3) 制動力の最適点を求めるために、外部から精密に制動力を変化できること、などの条件が必要となる。従来1), 2) に対しては回転式オイルダンパがあるが、制動力に安定性を欠く欠点があった。本論文では、このような目的のために希土類磁石を用いたトルクモータとタコジェネレータを利用したトルクフィードバック式動力計測システムを考案し、それを用いて行った水槽実験の結果について報告する。

2. 2 測定対象、浮体型波浪エネルギー変換システム (WECS-2)

本研究で測定の対象としたのは2個の浮体と連結棒から成る2浮体型波浪エネルギー変換器であり、以下これを WECS-2 (Wave Energy Converting System-2) と略称する。

この WECS-2 の概略図を描いたのが Fig. 1 である。各浮体は図中に描かれているように連結棒により連結され、その拘束を受けつつ浮体は上下、左右、さらに連結点を中心とした回転運動ができる構造になっている。Fig. 1 は入射波を右から受け浮体が動揺しているようすを描いたものであるが、この機構により、浮体の運動は連結棒と浮体との間の相対回転運動に変換される。この相対回転運動を利用したエネルギ

ー変換部を浮体内部に配備することで入射波のエネルギーを変換することができる。以上が動作原理である。なお、本論文では Fig. 1 に記述されているように入射波に対して前方に位置する浮体を R 浮体、後方に位置する浮体を L 浮体と呼ぶことにする。

ところで WECS-2 の理論解析により、 L 浮体を R 浮体に比べて大きくすることにより、その1次変換効率がかなり良くなることが報告されている⁵⁾。この場合、2次変換器として油圧モータ、空気圧モータ、発電機などの特性を仮定し、解析の便宜上回転角速度に比例したエネルギー変換ができる粘性減衰特性をエネルギー変換部がもつと考えて解析を進めた。したがって、水槽実験を行う場合、粘性減衰特性をもつエネルギー変換部とその動力計測システムが必要である。動作原理から類推されるように、エネルギー変換部において生ずる相対回転運動は、波によって引き起こされる浮体の運動がその源となっているため、ゆっくりとした往復運動でありその角速度は時間とともに変動するという特性をもつ。したがって、エネルギー変換部はつぎに示す3つの特性をもつことが要求される。

- 1) 変動する角速度に比例した反トルクすなわち制動を加えることができること。
- 2) そこで消費したエネルギーを簡単に計測できること。
- 3) トルクの角速度に対する比例定数が粘性減衰係数であるが、その粘性減衰係数を容易に設定することができること。

このような要求に見合う変換部を次節で述べるトルクモータとタコジェネレータによって構成した。

3. エネルギー変換量測定部

Fig. 2 はエネルギー変換量測定部の概念図を描いたものである。浮体間をつなぐ連結棒の回転軸と同軸にトルクモータとタコジェネレータを浮体内部に装備する。入射波を受けると連結棒の回転軸に回転角速

Fig. 1 Schematic diagram of WECS-2

Fig. 2 Schematic diagram of measurement system

度 $\theta(t)$ が生じ、同軸に取付けられたタコジェネレータにより $\dot{\theta}(t)$ に比例した電圧 $v(t)$ が得られる。この信号 $v(t)$ を電圧-電流変換部を通して電流信号 $I(t)$ に変換しトルクモータに供給する。トルクモータは供給された $I(t)$ に比例したトルクを発生することができるので、結局 $\theta(t)$ と符号を反転した電流 $I(t)$ を用いて $\dot{\theta}(t)$ に比例した反トルクをトルクモータによって得ることができる。

つぎに、このエネルギー変換量測定部で 1 周期あたり消費された仕事 W を考える。運動の周期を $P_f(s)$ 、トルクモータにより発生させるトルクを $T(N \cdot m)$ とすると W は

$$W = \int_0^{P_f} T \cdot \dot{\theta} dt \quad (3.1)$$

で与えられるが、トルク T は供給した電流 I に比例するので、その比例定数を k とすると

$$W = \int_0^{P_f} k I \cdot \dot{\theta} dt \quad (3.2)$$

で仕事 W を求めることができる。上式から I と $\dot{\theta}$ を計測すればよいことがわかる。

また、電圧-電流変換部において、その変換ゲインが粘性減衰係数に対応しており、このゲイン設定が容易な変換部を構成することによりちょうど前章の要求に見合うエネルギー変換量測定部が得られる。

今回使用したトルクモータ（インランド社、T3203 および T4076）とタコジェネレータ（同社、TG2939D）はつぎのような特徴をもっている。

1) トルクモータ

- 直接駆動ができるため歯車のバックラッシュがなく高精度の位置制御ができる。
- 低速、大トルク、低リップルのため、低速で高精度の速度制御が可能である。
- 応答性が良く、電流-トルクの直線性もすぐれている。（後述）

2) タコジェネレータ

- 誘起電圧係数が高い（今回使用したタコジェネレータでは、最大誘起電圧係数は 0.544 V/rpm）ため歯車で増速する必要がない。
- 応答性が良く、直線性も 0.1~1% と非常に良い。

Fig. 3 Apparatus for calibration of torque motor

1) - c) で述べた電流-トルクの直線性を調べるために使用した実験装置の構成を Fig. 3 に示す。トルクモータに電流を加えて発生したトルクを小型トルク変換器（共和電業、TP-500 GMC）と動ひずみ測定器（同社、DPM-305 B）を用いて計測を行った。得られた結果が Fig. 4 である。横軸は供給電流縦軸は発生したトルクである。（a）、（b）はそれぞれ $R \cdot L$ 浮体に搭載されるトルクモータに関して得られた図である。これらより多少のパラッキはあるが直線性が良いことがわかる。最小 2 乗法を用いて得られた比例定数 k はつぎのとおりである。

$$k_R = 0.392 \text{ N} \cdot \text{m/A}, \quad k_L = 0.765 \text{ N} \cdot \text{m/A} \quad (3.3)$$

また、同様の装置を用いて周波数特性を調べ、得られた結果が Fig. 5 である。読みとり誤差などもあり多少のパラッキはあるがほぼ一定のゲインが得られている。また位相は少し大きい値となっているが、この中

Fig. 4 Current-torque characteristics of torque motor

Fig. 5 Frequency characteristics of torque motor

Fig. 6 Outline of experimental system

にははずみ計の遅れも含まれていると思われるので、実際にはこれより特性は良いと考えられる（後述の実験値参照）。

4. 実験装置および計測システム

Fig. 6 が今回の実験において使用した実験装置および計測システムの全体像である。これらを図中一点鎖線で囲んだ3つの主要部分に分け、各部について述べる。

(a) 電圧・電流変換部

タコジェネレータより得られる電圧を高インピーダンス、耐ノイズ性のよい計装アンプで受け Multiplying D/A に送る。この Multiplying D/A は、計装アンプからの出力電圧をつぎのパワーアンプへ送る際のゲイン設定を行う役割をもつ。前章でも述べたように、このゲインが粘性減衰係数に対応しており、具体的には(c)部のマイクロコンピュータ AP 990 により簡単に設定できる構成にしてある。さて、Multiplying D/A からの出力はパワーアンプに供給され、入力電圧に比例した電流がトルクモータに与えられる。エネルギー変換部での変換されたエネルギー量の計測は、(3.2)式から電流 I と角速度 $\dot{\theta}$ の計測により行うことができる。そこで、トルクモータに供給される電流はアイソレーションアンプを通して、またタコジェネレータからの出力電圧は直接(c)部のローパスフィルタ、A/D を介して AP 990 に取込みデータ処理を行う。この際、(3.2)式は次式のように近似して計算を行う。

$$W = \sum k I \cdot \dot{\theta} \Delta t \quad (4.1)$$

(b) 水槽

水槽の諸量は Fig. 6(b) に示すとおりである。実

Fig. 7 Recorded output signals

験で使用した入射波の特性は

入射波周期 0.8~1.4 s, 波高 2.7~1.5 cm

である。WECS-2 の前後にあるセンサは容量式波高計センサ（東京計測技研、C-300）であり、それぞれ入射波、透過波の計測に用いる。

(c) 計測システム

(a), (b) で得られた情報はすべて AP 990 で処理する。また、造波装置駆動部内のフライホイールに取付けたフォトセンサの出力パルス間隔はクロックジェネレータにより発生する 5 ms の矩形波を計数して入射波周期の計測を行うために利用する。さらに、このクロックジェネレータの出力はカットオフ周波数 10 Hz のローパスフィルタを通して A/D 変換する際のサンプリング時間の設定用にも利用している。つまり、(4.1)式中の Δt が 5 ms となる。なお、今回使用した A/D 変換器はつぎのような仕様である。

A/D 変換器 (DATEL 社, ADC-Hz)

○ 12 bit ○ 逐次比較型 ○ 入力レベル ± 5 V

○ 直線性 $\pm \frac{1}{2}$ LSB ○ 変換速度 52.2 μ s

ローパスフィルタの出力はレコーダにも入力され、その出力から現在の浮体の運動状態や入射波、透過波の様子を知ることができる。この出力例を示したのが Fig. 7 である。図中上から R 浮体に取り付けられたタコジェネレータの出力電圧 $\dot{\theta}_R$ 、同浮体内のトルクモータに供給された電流 I_R 、入射波 A_{in} 、透過波 A_{out} を示している。この図は、入射波周期が 1.1 s のときの例である。 $\dot{\theta}_R$ と I_R の図を比較すると位相のズレは見られず、電圧・電流変換がうまく行われていると考えられる。入射波の計測は、定常になるのを見はからって 4~5 波分を平均して波高（振幅×2）を求

めた。ここで、入射波が規則波であり深海波であると仮定すると微小振幅波理論から、次式で単位時間単位幅あたり入射する波のもつエネルギー E_{in} を求めることができる。

$$E_{in} = \rho g^2 A^2 / (4\omega) \quad (4.2)$$

ここで、 ρ : 流体密度、 g : 重力加速度

A : 入射波振幅、 ω : 入射波角周波数

システムが変換したエネルギー E は、浮体の動揺の定常待ちの後、 R, L それぞれの浮体内部に搭載したエネルギー変換量計測部からのデータを 4~5 波計測し (4.1) 式にしたがってのおおの計算して足し合わせて、その平均より算出した。以上より、WECS-2 の 1 次変換効率は、定義から

$$\eta = E/E_{in} \quad (4.3)$$

で表わされ、この式に基づいて効率 η を計算した。

5. 実験結果

今回製作した浮体の形状、寸法ならびに各物理定数を Fig. 8, Table 1 に示した。ここでは、Lewis form⁽⁴⁾ にしたがう形状をもつ浮体を考えているので、浮体は Fig. 8 にあるように対称形である。なお、表中 h', r' は各浮体のメタセンタの高さ、回転半径であり、浮体の水線幅 B を用いて無次元化している。また W は排水量である。

つぎに、これらを組み立てた状態の概略を描いたのが、Fig. 9 である。浮体の中心線間の距離 l を浮体間距離と呼ぶ。また、図中一点鎖線の円はトルクモータの搭載位置である。

Fig. 8
Lewis forms

Table 1 Physical parameters of system 1

	H_0	σ	h'	r'^2	$W(\text{kg})$
R	0.417	0.958	0.0691	0.1301	16.30
L	0.247	0.951	0.0465	1.402	61.34

(注) Lewis form とは Table 1 にある 2 つのパラメータ H_0, σ により決定される浮体形状をいう。

$H_0 = B/(2D)$, $\sigma = S_0/(BD)$

(B : 水線幅、 D : 喫水、 S_0 : 断面積 (Fig. 8 参照))

実験結果の一例を示したのが Fig. 10 である。横軸は無次元波周波数 ξ_D で、 R 浮体の喫水深さを D とすると、

$$\xi_D = \omega^2 D / g \quad (5.1)$$

で表わされる。縦軸は (4.3) 式で定義された効率である。また、上部の目盛は使用した波周期 $P_T(\text{s})$ である。図(a)中 η_R, η_L は R, L 浮体内部に搭載されたトルクモータによる変換効率であり、全効率 η とは $\eta = \eta_R + \eta_L$ の関係がある。Fig. 10 は粘性減衰係数 μ_R, μ_L を一定として、浮体間距離 l を 3 通りに変えて行った実験結果の例である。なお μ_R, μ_L は文献 5) にしたがって無次元化した値である。

図より、 l の値のいかんによりややその特性は変わるが、どの場合もその傾向はよく似ており、 η_R, η_L がこのシステムにおいて互いにうまく補い合って全効率を向上させていることがわかる。したがって、図(b)に描かれている全効率 η は、 $l=70 \text{ cm}$ の場合で入射波周期 $T=1.3 \sim 1.0 \text{ s}$ の範囲にわたって 90% に近い、もしくはそれ以上の効率特性が得られている。

6. 結 論

トルクモータを利用したトルクフィードバック方式のエネルギー変換量測定部を製作し、それを搭載した浮体を用いた WECS-2 について実験を行った結果、以下のことが判明した。

- 1) トルクモータを利用してエネルギー変換量測定部を構成することにより、浮体の運動に精度よく制動をかけ、その制動力を簡単に計測することが

Fig. 9
Schematic diagram
of system 1

Fig. 10 Efficiency characteristics of system 1

でき、かつその制動力も外部から高い精度で調整が容易にできる計測装置が得られた。この種の規模のエネルギー変換システムの1次変換効率計測用として適切な装置と考えられる。

- 2) データ処理用として用いたマイクロコンピュータ AP 990 によって、実験中の結果をその場で処理、判断できるのですぐれた計測システムを構成することができたといえる。

製作した変換部を搭載した WECS-2 について効率特性を検討した結果、非常に高い変換効率をもつシステムであることがわかった。かつ、このエネルギー変換量測定装置は外部から変換量を高い精度で調整できるため、実験中に最適パラメータを求めることができるため、この種の研究には非常に適した装置であるといえる。

また、本装置は波浪エネルギー測定のみでなく、最初に示したように一般に往復回転を行う機器の動力を変換せずに直接測定したい場合にも適用できる。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、実験水槽の使用などに種々

のご便宜をいただいた本学土木工学科榎木 享教授、トルク測定についてご教示してくださった日々野文雄教授(神奈川大)、また貴重な討論をしてくださった本学の嘉納秀明助教授ならびに修士学生小田晃一君(現在日本鋼管)、学部学生大西 寛二君(現在石川島播磨重工)に感謝します。

なお、本研究は昭和 57 年度文部省科学研究費(試験研究)を受けたものであることを付記し謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 森田：機械計測学，p. 204，共立出版(1972)
- 2) 伊丹：動力測定，海文堂(1983)
- 3) J. M. Leishman and G. Scobie: The Development of Wave Power-A Techno-Economic Study, Department of Industry, NEL (1976)
- 4) 増淵：波浪エネルギー利用と計測・制御技術，システムと制御，27-10，615/624 (1983)
- 5) M. Masubuchi and R. Kawatani: Frequency Response Analysis of an Ocean Wave Energy Converter, Trans. ASME. J. of DSMC, 105-1, 30/38 (1983)