

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月20日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360370

研究課題名（和文） 電場応答エラストマーによる波浪発電技術の確立と発電装置の開発

研究課題名（英文） A establishment of technology of wave power generation using dielectric elastomer and a development of generation device

研究代表者

増田 光一（MASUDA KOICHI）

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：10120552

研究成果の概要（和文）：本研究の成果から誘電エラストマー（人工筋肉）波力発電装置の特性は、発電出力が殆ど波浪の周波数に依存せず、どの周波数でも人工筋肉が変形すればそれに応じた発電出力が得られることが明らかになり、これは、従来の波力発電装置と異なり波の静かな海域でも発電が可能であることが明らかになった。即ち、漁港、マリーナ等の補助電力の発電装置として本装置を使用する場合の実用化及び商用化の見通しが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：From the results of present research, the characteristic of power generation output of wave power generation device using dielectric elastomer (artificial muscle) was hardly dependent on the frequency of sea wave and when the artificial muscle changed on every frequency, it is clarified that the power generation output according to it is obtained. From the present results, it was understood that the present device is generated even in the calm sea of wave unlike conventional wave power generation device. Namely, the prospect of the utilization in the case of using this device as a power generator of auxiliary electric power, such as a fishing port and a marina, and commercialization became clear.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
2011年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2012年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
年度			
年度			
総計	13,100,000	3,930,000	17,030,000

研究分野：総合工学

科研費の分科・細目：船舶海洋工学

キーワード：海洋資源・エネルギー、人工筋肉発電

## 1. 研究開始当初の背景

## (1) 現状の問題点

OWCによる圧縮空気を利用する方式は、これまで多くの実績を残しているが、今後の実用化や商用化の戦略として、小型化というキ

ーワードが入ったときに厳しい現状がある。その原因として2段階のエネルギー変換の存在が挙げられる。エネルギー変換が2段階であるシステムを図1に示す。このようなシステムが現在の主流である。必然的に発

電出力に比べて装置は大型になり、システムの複雑化を含めて、コスト増の原因となる。結果的に風力等の再生可能エネルギー利用と比較して発電単価が高くなり、実用化・商用化が遅れている。これらの問題に対処する新たな方式として、図2のようにリニア発電方式や浮体運動でジャイロを直接回転させるジャイロ式（神戸大、神吉教授）などが提案されている。さらに、新たな可能性として圧電素子発電や本申請研究で適用する電場応答エラストマー発電を利用する方法が考えられる。この誘電エラストマーは本来アクチュエータとして開発されたもので、印荷することで伸びるという特性から人工筋肉と呼ばれる。これらは1次変換により直接電気エネルギーを得る。

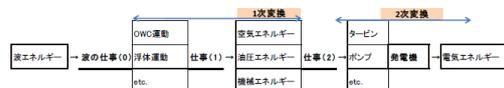


図1 2次変換過程を有する波浪発電システムのエネルギー変換過程概念図

これまでの波浪発電開発は図1の方式が圧倒的に多い。しかし、1次変換によって直接電気エネルギーを得ることは変換時のエネルギー損失を低減する観点から極めて有効である。図2に関する技術開発は波浪発電の発電単価を風力発電並みに下げることや利用形態の多様化に対して、そして国産技術による波浪発電商用化実現に向けたブレークスルーになり得る。

### (2) 誘電エラストマー（人工筋肉）の可能性

図2のシステム開発のため、本研究では誘電エラストマー（人工筋肉）を適用する。機械的発電機は重量が大きくなるだけでなく、複雑な機械装置となる。また、取り付け方法や大きさに対する冗長性に期待はできない。逆に、圧電素子や人工筋肉の発電装置にはそれらが期待できる。なぜなら、装置には電気回路があればよく、極めて単純な構成で発電できるからである。このような観点から、発電機ではなく、素子やエラストマーの発電特性を利用した海洋エネルギー利用技術には大きな可能性が秘められている。圧電素子による発電は大容量の電力確保という観点から人工筋肉によるそれに劣る。圧電素子発電はスパイク的であり一度の変形によるエネルギー出力は決して大きくない。人工筋肉は単純比較で30倍近い出力を望むことができる。本申請者らは、図2方式が可能で、かつエラストマーという加工性の良さや柔軟性という特徴から、波浪による発電と一言でいっても大きさも取り付け方法も多種多様な形態での発電の可能性のある人工筋肉を適用し、波浪エネルギーによる人工筋肉発電技術の確立を目指すに至った。

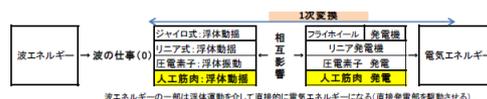


図2 1次変換で電気エネルギーとなる波浪発電システムのエネルギー変換過程概念図

## 2. 研究の目的

本研究では、発電技術に電場応答高分子膜を適用する。このゴム状の薄い高分子膜（エラストマー）は帯電させた状態で強制的に伸縮させることで電気エネルギーを発生する。従って、波の力を利用してこのエラストマーを伸縮させれば直接発電できる。本研究の目的は、1)波浪発電装置として、このエラストマーの発電特性がどのような設置方法・形体で最適化されるのかを明らかにすること、2)理論計算や数値計算によって提案する新方式波浪発電装置の発電出力を予測するシミュレータを開発すること、また3)物性を含めたエラストマーの特性を最大限に生かせる波浪発電技術を確立することであり、最終目標として4)発電装置の実海域試験用プロトタイプまで開発・設計することである。

## 3. 研究の方法

本研究は3つの研究機関と1つの協力組織（民間企業）で構成された研究体制の下、実験的研究と理論的研究および数値実験による検討により人工筋肉波浪発電技術を確立していく。実験では、人工筋肉本体の材料特性試験、発電ユニット性能試験、発電システム（浮体等）模型実験、実海域実証実験を計画する。理論計算においては、人工筋肉の浮体動揺問題への理論的取扱いの確立を行い、弱非線形ポテンシャル理論に基づく浮体動揺シミュレータを開発する。動揺シミュレータ開発に先立ち周波数領域での動揺計算プログラム開発も行う。また、粒子法（MPS法）による強非線形問題対応の計算による詳細な発電性能予測手法を開発する。以上を各研究班に分けて研究を進め、定期的な意見交換・情報交換を実施することで効率的かつ総合的に研究を遂行する。また、国内外の情報収集を行い、世界にも成果を発表していく。

### A 班：人工筋肉の基本特性評価（増田）

エラストマーである人工筋肉はさまざまな形状で作成が可能であるが、形状によって面的な変形の仕方が異なる。そのため、作成する形状ごとに発電特性をデータベース化する必要がある。最適だと思われる人工筋肉発電装置の形状・形態を提案し、その発電特性を求める。方法は装置ごとに空気中での強制振動試験により行う。当試験から人工筋肉のヒステリシスを求め、剛性成分と減衰成分（その和のインピーダンス特性）を周波数特

性に含めて求める。この結果を基に発電機としての人工筋肉の要求性能を決定し、発電用人工筋肉開発へフィードバックさせる。

#### B班：発電時の減衰特性と動揺理論の定式化（増田，居駒）

A班で実施した人工筋肉の発電時のインピーダンス特性を浮体動揺問題に取り入れる。浮体動揺によって直接的に人工筋肉を伸縮させると、発電と動揺の連成問題として浮体運動を扱う必要がある。インピーダンス特性を考慮した動揺理論を定式化する。周波数領域だけでなく、人工筋肉波浪発電シミュレータ開発のために時間領域での取り扱いについても具体的な定式化を行う。人工筋肉のインピーダンス特性は伸縮の変位や速度にしている場合には、周波数特性だけを考慮して係数を浮体の運動方程式に導入すればよい。しかしながら、エラストマーという特性上、必ずしも変位や速度に比例しない場合が考えられる。特に人工筋肉を許容限界まで引っ張る場合にはインピーダンス特性が大きく変化することが容易に予想される。この非線形性をどのような方法で直接的に運動方程式に導入するか、あるいは実用的な手法を提案するかをここでは検討する。時間領域の運動方程式への導入方法は、線形な特性であると仮定可能な場合には周波数領域の関数をフーリエ逆変換する方法で、いわゆる造波減衰係数のメモリー影響関数と同様の取り扱いで算出可能である。

#### C班：発電性能評価手法の開発（大澤）

人工筋肉による発電は波エネルギー吸収性能を指標として他の発電システムと比較すべきかについては疑問が出てくる。人工筋肉自体が発電機であるため、定格を越えるエネルギーはもとから吸収できないし電力として出力できない。世界の風潮であるポイント・アブソーバの性能評価手法等を調査しながら、適切な評価基準を提案していく。国際会議での情報収集や現地でのヒアリング調査が必要である。そのための海外旅費を要する。

#### D班：波浪発電技術の国内外の技術調査および発電用浮体の提案・設計（大澤）

Cにおける情報収集と同時に最近の世界における波浪発電技術や商用化についての情報収集や国や自治体の対応についての動向調査を実施する。海洋研究開発機構としての世界に持つ情報網とコネクションを最大限利用し直接的情報を本研究グループのみならず、国内の関連研究機関・研究者に提供する。

#### E班：浮体動揺および人工筋肉発電出力計算プログラム開発（居駒）

当該年度では、人工筋肉の発電時の特性を考慮した、周波数領域の浮体動揺解析プログラムを完成させ、時間領域のシミュレータとしてはラディエーション流体力のメモリー影響を考慮した動揺解析プログラム開発と合わせて、人工筋肉のインピーダンス特性を一定値としてどの程度シミュレーション結果が現実を再現可能か否かについて明らかにする。インピーダンス特性の運動シミュレーションへの導入方法を検討するために、周波数領域の係数から発電による減衰効果の遅延関数を作成することで、そのメモリー影響を考慮した場合の結果とインピーダンスを一定とした場合の結果比較しながら検討する。なお、当該年度の動揺シミュレーションでは線形波力のみを考慮し、一方向不規則波中の応答解析まで可能とするプログラム開発とする。エラストマーである人工筋肉の非線形なヒステリシスをどこまで考慮する必要があるかについても明らかにする。

#### F班：水槽実験による発電用浮体動揺特性評価（林，居駒）

規則波中での波浪中動揺実験および人工筋肉発電実験を日本大学理工学部船橋校舎に設置された平面水槽（24m×7m×最大水深1m）で実施する。不規則波中での同様の実験を東京大学生産技術研究所千葉実験所の海洋工学水槽（50m×10m×最大水深5m）にて実施する。対象とする発電装置の詳細は今後さらに検討して提案していく。

## 4. 研究成果

### (1) 平成 22 年度の研究成果

誘電エラストマーの発電特性を強制動揺模型実験から把握し、時間領域での波浪中浮体動揺計算に誘電エラストマー型波力発電装置の特性モデルを導入した数値計算システムを提案した。本実験と本システム用いて得られた成果は、以下のとおりである。

- ① 誘電エラストマーは、印加電圧を加えることでたわみ、ばね定数が小さくなり、この特性は、縮時即ち発電時に現れるため発電量に影響する。
- ② 誘電エラストマー発電は、周期に依存せず、**damping** は、ゴムの物性としての **damping** であり発電量に影響しない。
- ③ 誘電エラストマー発電の原理を浮体動揺シミュレータに導入するためのモデル化を行い、それにより誘電エラストマー型浮体式波力発電装置の動揺量及び発電量の推定を可能にした。

### (2) 平成 23 年度の研究成果

平成 22 年度までの水槽実験及び数値シミュレーションの成果から誘電エラストマー

(人工筋肉) 波力発電装置の特性は、発電出力が殆ど波浪の周波数に依存せず、どの周波数でも人工筋肉が変形すればそれに応じた発電出力があることが明らかになり、これはこれ従来の波力発電装置と異なり波の静かな海域即ち港湾内でも発電が可能であることが明らかになった。このことは、平成 23 年度の静岡県下田市須崎漁港の港内静穏海域での実海域実証実験で確認されている。実海域実験では、発電出力をコンピュータによる定量的な計測のみならず現実的に LED ライトを夜間点灯させ現実的に漁港岸壁の補助灯またはマリナー浮き桟橋の補助灯などに必要な小規模発電等の実用に供し得る発電出力があることを確認した。実海域実験で使用した小型発電ブイと発電出力の図を図 3-1、実験装置概念図を図 3-2、1 分間の実験模型の運動変位の時系列を図 3-3、1 分間の誘電エラストマーの総出力エネルギーを図 3-4 に示す。



図 3-1 小型発電ブイと発電出力

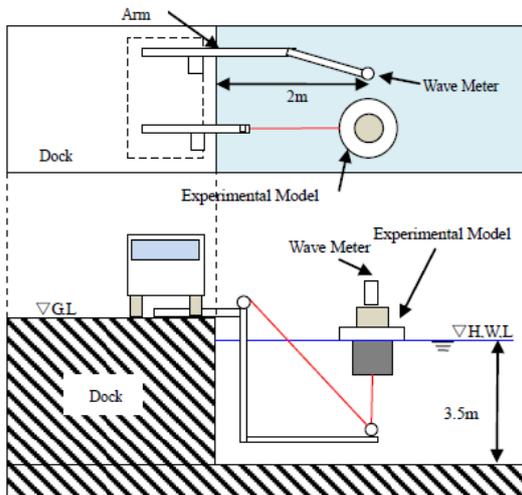


図 3-2 実験装置概念図

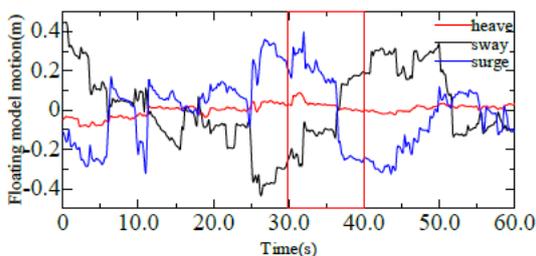


図 3-3 1 分間の実験模型の運動変位時系列

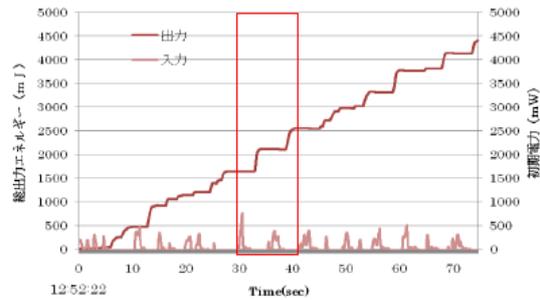


図 3-4 1 分間の誘電エラストマーの総出力エネルギー

### (3) 平成 24 年度の研究成果

平成 24 年度までの研究で小規模発電に供し得る場合、直ぐにでも実用化が可能であることが明らかになった為、マリナー、漁港等の浮き桟橋の補助灯としての実用化及び商用化を目指してドルフィン係留された浮き桟橋をイメージした実験模型を作成し、誘電エラストマー波浪発電装置を浮き桟橋に取り付け実験を行った。補助灯の電源として必要な出力を発電することは、十分可能であることが明らかとなった。さらに、本研究では誘電エラストマーを用いた発電ブイによる実証試験を行い、発電量に関して以下の知見を得た。

- ① 50 分間で発電量を評価した場合、バイアス電圧 3000V 時で 32.14J の電気エネルギーが得られた。この発電量を今後の発電量を評価する際の最低単位として、エラストマーの増量検討に用いる。
- ② 誘電エラストマーを 5 倍まで増量した場合であってもブイの応答に大きな影響を与えず、十分な発電性能を維持できると判明した。今回の結果から誘電エラストマー発電ブイの発電性能を現状よりも向上させることができると結論付ける。今後の研究課題としては、装置の複数基配置の検討やより大きな波パワーを持つ海域への装置の投入などの検討を実施する必要がある。さらに、本発電装置を本格的に実用化及び商用化するためには、エラストマー製造技術を上げることが重要であり、とくに所定の発電量を得るためには、エラストマーの性能を落とすことなく大型化する技術及び大量生産技術が重要であると判明した。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 3 件)

- ① 居駒知樹, 増田光一, 中津川和志, 和氣

美紀夫, 千葉正毅: 誘電エラストマーを利用した浮体式波浪発電ブイの実海域における発電実験, 第 22 回海洋工学シンポジウム (OE22-096) 日本海洋工学会, 日本船舶・海洋工学会, 2011

- ② 増田光一, 居駒知樹, 中津川和志, 和氣美紀夫, 千葉正毅: 誘電エラストマーを利用した浮体式波浪発電ブイの実海域における発電特性, 第 23 回海洋工学シンポジウム (OE23=082) 日本海洋工学会, 日本船舶・海洋工学会, 2012

- ③ Koichi Masuda, Tomoki Ikoma, Miko Waki, Seiki Chiba: A Real Sea Test of Wave Powered Generatin Bouys Using Dielectric Elastomers, Proceedings of ASME2012, 31th International Conference Ocean Offshre and Arctice Engineering OMAE2012

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

増田 光一 (MASUDA KOICHI)  
日本大学・理工学部・教授  
研究者番号: 10120552

### (2) 研究分担者

大澤 弘敬 (OSAWA HIROYUKI)  
(独)海洋研究開発機構・海洋工学センター・グループリーダー  
研究者番号: 00371732

### (3) 連携研究者

林 昌奎 (RHEEM CHANG KYU)  
東京大学・生産技術研究所・教授  
研究者番号: 70272515  
居駒 知樹 (IKOMA TOMOKI)  
日本大学・理工学部・准教授  
研究者番号: 50302625