Technical Paper

Electric Generators Using Dielectric Elastomers Driven by Karman Vortex in Water Flow

Kenta HASEGAWA^{*1†}, Seiki CHIBA^{*2}, Mikio WAKI^{*3} and Taishi WADA^{*4}

(Received March 30, 2015)

カルマン渦により駆動する誘電エラストマーを用いた水力発電に関する研究

長谷川賢太^{*1†}, 千葉正毅^{*2}, 和氣美紀夫^{*3}, 和田大志^{*4}

This study focuses on the electric power generation performance of the system using the dielectric elastomer (DE). A simple experimental model is fabricated to test in a passing water tank in order to investigate the performance and feasibility of the small hydroelectric generation system using DE. This system is driven by Karman vortex in the wake of a cylinder fixed in water flow. The characteristics of DEs can be utilized for producing electric power effectively. The wing, which is an important part in the generation system to convert fluid energy into mechanical energy and is set behind the cylinder, vibrates due to the pressure caused by Karman vortex, resulting in conversion of the water flow energy into electric energy by the DEs. Experimental results show that an average output power of approximately 16 mW is verified with the generation efficiency of about 3.6%, when the diameter of the cylinder is 60 mm, the span and chord length of the wing are 120 mm and 30 mm, respectively, the distance between the cylinder and the wing is 170 mm, and the velocity of the water flow is 0.50 m/s.

Key Words

Artificial muscle, Actuator, Dielectric elastomer, Hydro power generation, Wing power generation, Karman vortex

本研究は、人工筋肉（ソフトアクチュエータ）素子として知られる誘電エラストマーが有する発電性能に注目した。誘電エラストマーを利用した小型水力発電の可能性とその性能を評価するために、簡易型の原理証明用デバイスを作製し回流水槽にて実験を行った。この発電機構は一樣水流中に固定された円管の後流に発生するカルマン渦により駆動し、効率的に誘電エラストマー発電を可能にした。本機構の重要な要素である翼は円管の後方に設置され、カルマン渦による圧力を受けて振動させ流体エネルギーを機械エネルギーに変換する。その機械的外力により誘電エラストマーによって電気エネルギーへと変換される。直径 60 mm の円管を用い翼のスパンとコード長をそれぞれ 120 mm と 30 mm、翼と円管の距離を 170 mm、流速を 0.50 m/s 時に、発電効率約 3.6%で約 16 mW の平均出力パワーを確認した。

キーワード

人工筋肉, アクチュエータ, 誘電エラストマー, 水力発電, 風力発電, カルマン渦

- ※1 National Maritime Research Institute
6-38-1 Shinkawa, Mitaka-shi, Tokyo 181-0004, Japan
(former Yokohama National University)
- ※2 Chiba Science Institute
Meguro-ku, Tokyo, Japan
- ※3 Wits Inc.
880-3, Oshiage, Sakura-shi, Tochigi 329-1334, Japan
- ※4 Kyoto University
Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto-shi, Kyoto 606-8501, Japan

† Corresponding Author (hasegawa-k@nmri.go.jp)

- ※1 海上技術安全研究所 海洋開発系
〒181-0004 東京都三鷹市新川 6-38-1
(前 横浜国立大学)
- ※2 千葉科学研究所
東京都目黒区
- ※3 有限会社 Wits
〒329-1334 栃木県さくら市押上 880-3
- ※4 京都大学
〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町

1. 緒 言

商業用の発電はそのほとんどが電磁誘導を利用し、機械エネルギーにより発電機が回転する。その機械エネルギーは風や落下する水、水蒸気などにより回転するタービンから作られる。今日、環境汚染や人口増加等が原因で再生可能エネルギーを利用した小型発電システムの普及が非常に期待されている¹⁾が、電磁誘導を用いた従来の発電機がその用途に適しているとは言えない。これらの発電機は高い周波数領域で効率的に作動する傾向にあるため、電磁誘導を利用した発電システムには変速機などの装置が必要とされる。その結果、機構がより複雑化や大型化、高コスト化等が起こり普及の妨げとなっていると考えられる。Wang ら²⁾はカルマン渦列によって誘起される振動からのエネルギーを利用した新しい電磁エネルギー回収方法を提案している。その機構ではタービンやトランスミッションは使用されずに流体流れと鈍頭物体から放出される渦、電磁誘導により流体エネルギーを電気エネルギーに変換する。彼らは 37.9 cm³ の体積を持つ模型を作製し水流中にて実験を行い、流速 1.38 m/s、約 62 Hz の振動数で 0.3 kPa に近い振幅の圧力変動において約 20 mV、1.77 μW の出力を得ている。また、Nguyen ら³⁾は圧電効果を利用した発電機を Wang らの発電システム²⁾に適用し空気流中での実験を行い、流速 20.7 m/s、約 872 Hz の振動数で 70 Pa に近い振幅の圧力変動において約 14 mV、0.59 nW の出力を示している。タービンやトランスミッションを用いずに電磁誘導や圧電効果を利用した発電機を作動させるとシステム自体はシンプルになるが、その性質から得られる出力が非常に小さくなる。

本研究において我々は水流中のカルマン渦により駆動する誘電エラストマーを発電機として用いた新しいタイプの小型発電を考案した。誘電エラストマーを利用した小型ダイアフラム型発電機と翼によってカルマン渦が持つエネルギーを電気エネルギーへ変換可能で、シンプルな構造で効率的な発電が期待できる。この性能や実現性を調査するために、簡易型の原理証明用デバイスを作製し実験を行った。

2. 誘電エラストマー (Dielectric Elastomer: DE)

2.1 開発背景

誘電エラストマー (以下、DE) は 1991 年の後半から千葉、Perline ら⁴⁾が提唱し、その後各所で開発が進んでいる新しいトランスデューサ技術である^{5)~7)}。その構造は非常にシンプルで、DE 膜を伸縮可能な 2 枚の電極で挟んで構成される^{5)~7)}。DE はよくアクチュエータとして使われ、電極間に電位差を与えることでクーロン力により両電極が引き合い、その結果 DE が厚さ方向に収縮し、面方向へ伸張する。近年では、この DE の逆駆動、すなわち外力により DE を伸縮して得られる電気エネルギーが再生可能エネルギーの新しい回収手段として注目を集めている^{8)~11)}。

2.2 DE 発電機の動作原理

DE は、アクチュエーションモードと逆の動きをさせることにより発電するが、このモードで DE は体積が変化しない可変コンデンサーとなると考えられる⁸⁾。

電荷は DE 膜が伸張された際 (高容量)、その膜上に現れる (Fig. 1a)。この膜が収縮すると (低容量)、DE の弾性力が電場応力に対抗して働き、電気エネルギーが増加する (Fig. 1b)。微視的には、膜の弾性力により電荷を各電極に押し出し (収縮状態で DE 膜の厚さが増加)、また電極で各電荷間の距離が短くなる (収縮状態で平面領域が減少)。このような電荷の変化が電圧を増加させ、その結果、静電エネルギーが増加する。

DE 膜の静電容量 C は以下のように記述することが可能である^{8)~10)}。

$$C = \epsilon_0 \epsilon \frac{A}{t} = \epsilon_0 \epsilon \frac{b}{t^2} \quad (1)$$

ϵ_0 は自由空間の誘電率で、 ϵ は DE 膜の誘電定数、 A は DE 膜の可動領域、 t と b はそれぞれ DE 膜の厚さと体積である。(1) 式において DE 膜の体積は本質的に不変であるので、 $At = b = \text{一定}$ となる。

電圧の変化を考える場合、基本的な回路における短時間の間では DE の電荷 Q は一定であると言える。 $V = Q/C$ であるので、収縮状態の電圧 V_2 は伸張状態の電圧を V_1 とすると以下のように表すことができる。

$$V_2 = \frac{Q}{C_2} = \frac{C_1}{C_2} \frac{Q}{C_1} = \frac{C_1}{C_2} V_1 \quad (2)$$

C_1 及び C_2 は、それぞれ伸張及び収縮状態における DE の静電容量となる。 $C_2 < C_1$ であるから、収縮状態の電圧は伸張状態の電圧よりも高くなることがわかる。(2) 式より得られる V_2 は高インピーダンス測定に基づく実験結果とよく一致することが確認されている¹¹⁾。

伸張及び収縮という 1 サイクル当たりの DE 発電機の出力エネルギー E は DE の静電容量の変化と関係しており、

Fig. 1 Operation principle of DE generator¹¹⁾

$$E = \frac{1}{2} C_1 V_b^2 \left(\frac{C_1}{C_2} - 1 \right) \quad (3)$$

(3) 式から求めることができる。 V_b はバイアス電圧である。

DE が産み出す発電量はその最大ひずみと誘電破壊強度により決定される。DE にアクリルやシリコンエラストマーのようなポリマー素材を使うことによって、圧電や電磁材料よりも 1 桁以上大きなエネルギー密度が得られている⁹⁾。このような高いエネルギー密度に加え、これらの式からエネルギー変換効率が動作周波数に直接関係がないことがわかる。DE を用いた発電は、DE の変形量に関係しており、圧電素子のように急速な変形速度は必要をしない。したがって DE 発電機は既存の発電機では実現が難しい人の動きや波浪のような低周波数領域での効率的な発電に最適であると言える⁹⁾。

2.3 DE 発電機を用いた波力発電

2007 年に SRI インターナショナルと (株) HYPER DRIVE はアメリカのフロリダ州タンパにて 300 g の DE を用いた発電機を気象観測用ブイに搭載し、海洋波の動きにより DE を伸縮させて発電する世界初の海洋実験を行った¹⁰⁾。使用された発電機ユニットは直径 40 cm、高さ 1.2 m の円筒管の形をしており、その中に直径約 30 cm、伸張状態での高さ 20 cm の中空ロール型の DE モジュールが 2 つ取り付け、2 週間程実験が行われた。実験室では最大 40 J のエネルギーを確認したが、タンパ湾で発生する波が常時小さく、10 cm 程度の波で、最大 11 W、平均、1.2 W の出力を得た。

また、DE 発電機による発電量が動作周波数に依存しないことを論証するために 2 次元造波水槽において波周期 0.7 から 3 sec、波高 2 から 6 cm の試験条件で超小型モデルの実験がなされた¹¹⁾。使われた発電ユニットは 2.8 g のアクリルエラストマーとカーボンブラックから作られた電極で構成されたダイアフラム式 DE トランスデューサである。外径 100 mm の円管状の装置に 8 枚のアクリルエラストマーが使われ、その DE 発電機は伸張と収縮の 1 ストロークで最大約 46.58 mJ の発電性能を示し、このとき 47.53 N の機械的エネルギーが必要である。

この実験結果から、1 つの波で得られた最大発電量は波高 6 cm で約 42 mJ であり、この時の波周期は係留された浮体の固有周期の約半分である 1.2 sec であった。これは分数調和共振のため浮体の動揺が大きくなったと考えられ、その他の波周期では 1 つの波で得られた発電量は近い値を示し、その波高にのみ依存していた。すなわち DE 発電機は動作スピードに依存せずにエネルギーが得られることが示された。

3. 実験概要

3.1 動作原理

我々が考案した小型水力発電はダイアフラム式 DE 発電をベースにしており、水流中のカルマン渦を利用して発電を行う。

カルマン渦とは鈍頭物体の後流に周期的に発生する渦列である (Fig. 2)。渦は鈍頭物体の両側から交互に形成され、

Fig. 2 Karman vortex street

それぞれ逆の渦度を持つ。これらの渦は外側の流れと混ざることなく十分な時間経過後、粘性影響により消失する。円柱後流に生じるカルマン渦はレイノルズ数 Re が約 40 から 3.7×10^5 の範囲で発生するとされている¹²⁾。 Re は慣性力と粘性力との比で定義される無次元数で以下のように記述される。

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad (4)$$

ここで、 U は流体の代表速度を示し D は物体の代表長さ (円管直径)、 ν は動粘性係数である。一般にカルマン渦の発生周波数 f_v は U と D によって無次元化され、ストローハル数 St と呼ばれる。したがって St は

$$St = \frac{f_v D}{U} \quad (5)$$

と表され、カルマン渦を放出する物体が円柱の場合、約 $500 < Re < 3.7 \times 10^5$ の範囲において St が約 0.2 になることが実験的に求められている¹²⁾。

この現象に基づいて、本発電システムは設計された。本実験で想定された発電ユニットは直径 80 mm のダイアフラム式 DE 素子 (Fig. 3) で、中心位置 (収縮状態) から 10 mm のストロークにより 8 mJ の発電が可能である (Fig. 3d)。このときに必要な外力は 4.9 N で、Fig. 3c に示すように、この DE 素子は約 490 N/m のバネ定数を持つ一種のバネと考えられる。

Fig. 4 に本システムとその動作原理の概要を示す。翼と本実験で用いた 2 つの DE バネが円管の前後に設置され、それぞれ支点を介してシャフトにより繋がっている (Fig. 4a)。

Fig. 3 (a) Photo of DE generator. Black part is DE with a diameter of 80 mm. The center of the device is pushed and released to function. (b) Cross section view of DE generator. DE film is set in the middle of the case. (c) Pushing force as a function of stroke. (d) Generated electric energy as a function of stroke

Fig. 4 Schematic diagrams of the system and operation principle

円管は一様流中に固定されており、その後流にカルマン渦が発生する。翼は次々に放出される渦の低圧に引き寄せられ振動し、その結果 DE バネのストロークを得ることができる(Fig. 4b)。

3.2 実験装置

我々が提案した小型水力発電システムの実現性の実証とその発電性能の評価を実験的に行うため、実験モデルを作製し2次元回流水槽において実験を行った。使われた回流水槽の観測部は長さ1000 mm、幅300 mm、水深200 mmで、本実験では流速 U を0.30から0.70 m/sまで0.05 m/s毎に設定した。これらは(4)式により約 $1.8 \times 10^4 < Re < 4.2 \times 10^4$ の範囲に相当する。Fig. 5に実験装置の概要図と写真を示す。実験装置は水槽のカバーに固定されている。まず、カルマン渦を生成する鈍頭物体には3種類の円管を用いた。円管はどれも塩化ビニル製で高さが290 mmであり、円管直径 D が48, 60, 76 mmの3種類の円管が使用された。約490 N/mのバネ定数 k を持つ2つのDEバネが円管の上流470 mmの位置に設置され、その間にアルミ製のシャフトが置かれた。シャフトは円管上流370 mmに設置した支点を通り、カルマン渦が発生する領域に設置した翼と繋がっている。本実験で使用した翼はNACA0021の形状(Fig. 6)を持ち、スパンとコード長がそれぞれ120 mmと30 mmで、エポキシ樹脂で作られている。この翼がカルマン渦の影響を受け流体エネルギーを機械的エネルギーへと変換する。翼上部の固定具には反射テープが貼られ、下流側に設置した回転計により1 mm単位のDEバネの各ストローク x に対応する翼の振幅 a での翼の振動数を回転計のレーザー光の照射ポイントを調整することにより測定した(Fig. 7)。ある振幅に定められた回転計のレーザー光を翼の振動と共に動く反射テープが往復する回数を3分間計測し、それぞれの振幅におけるカウント数の合計を計測時間で除したものを翼及びDEバネの振動数 f (Hz) とした。各振幅でのカウント数はその振幅よりも大きい振幅におけるカウント数を引いている。また、翼の振動数はDEバネの振動数 f と一致し、DEバネのストローク x に対応する翼の振動振幅 a は翼の設置される位置により

Fig. 5 (a) Schematic drawing and (b) photo of the fabricated system

Fig. 6 Cross-sectional view of wing with NACA0021

決まる。

本モデルにおける発電に最適な翼の位置を調べるために、各流速 ($U = 0.30 \sim 0.70$ m/s) と各円管 ($D = 48, 60$ and 76 mm) に対し翼の位置 L を円管中心から50から210 mmまで10 mmステップで変化させ実験を行った。想定される出力はDEバネの振動数 f とストローク x から計算できる。

Fig. 7 Schematic view of the measuring system (top view)

本実験で使用した DE バネは Fig. 3 で示した DE 発電機と同等の性質を持つので、本モデルで想定される出力 P は、DE 発電機のストロークに対する発電量を S (0.8 mJ/mm) とすると次のように表すことができる。

$$P = nSxf \quad (6)$$

n は DE バネの数 (2 units) である。しかしながら、DE 発電機の性能上ストロークが 4 mm 以上でないと発電量が得ることができないため、ここでは $x < 4$ mm の計算を除外した。本機構における入力エネルギー E_{in} は、翼の駆動力の基となるカルマン渦を発生させる円管に流入する流水が持つエネルギーとし、水の密度を ρ 、円管の投影面積を A とすると、

$$E_{in} = \rho AU^3 \quad (7)$$

となり、したがってエネルギー変換効率 η は (8) 式のように表すことができる。

$$\eta = \frac{P}{E_{in}} = \frac{nSxf}{\rho AU^3} \quad (8)$$

4. 実験結果及び考察

Fig. 8 に各円管 ($D = 48, 60$ and 76 mm) での想定される出力 P の実験結果を示す。それぞれのグラフは横軸が翼と円管中心との距離 ($L = 50 \sim 210$ mm)、縦軸が流速 ($U = 0.30 \sim 0.70$ m/s) のコンター図となっている。Fig. 8a に示すように円管直径 D が 48 mm のとき、翼と円管中心の距離 L が約 170 mm、流速 U が約 0.45 m/s で想定される出力 P が最大となり、そのときの値は約 11.6 mW である。円管直径 D が 60 mm のときは、翼と円管中心の距離 L が約 170 mm、流速 U が約 0.50 m/s で想定される出力 P が最大となり、約 16.3 mW となった (Fig. 8b)。 D が 76 mm では、 L が約 190 mm、 U が約 0.50 m/s 付近で想定される P が最大となり、そのとき約 12.7 mW であった (Fig. 8c)。Fig. 8 が示すように、それぞれの円管で想定される出力 P には 1 つのピークが存在するので、本機構では最大出力を得るために最適な翼と円管との距離 L と流速 U の条件を選択しなければならない。また、ピークから離れた条件下では出力がほとんど得られないということを把握しなければならない。出力 P が最大となる条件では水の流体運動とバネの弾性変形の複合効果から生じる自励振動や共振などに相応していると考えられる。ここで、さらなる計算解析が最大出力を得るための U や L の最適条件を見出すのに有効と思われる。

Fig. 9 に各円管 ($D = 48, 60$ and 76 mm) でのエネルギー変換効率 η の実験結果を示す。それぞれのグラフは横軸が翼と円管中心との距離 ($L = 50 \sim 210$ mm)、縦軸が流速 ($U = 0.30 \sim 0.70$ m/s) のコンター図である。Fig. 9a に示すように円管直径 D が 48 mm のとき、翼と円管中心の距離 L が 170 mm、流速 U が 0.40 m/s でエネルギー変換効率 η が約 5.6% で最大となり、円管直径 D が 60 mm のときでは、翼と円管中心の距離 L が 170 mm、流速 U が 0.50 m/s 付近でエネルギー変換効率 η が最大となり、約 3.8% となった (Fig. 9b)。 D が 76 mm では、 L が約 190 mm、 U が約 0.50 m/s 付近において η が約 2.3% で最大であった (Fig. 9c)。各円管において Fig. 9 に示すエネルギー変換効率 η のピーク位置は Fig. 8 の出力 P のピーク位置とほぼ一致した。

以上の実験結果から想定される最大出力 P は約 16.3 mW

Fig. 8 The electric power generation (P) for $D =$ (a) 48 mm, (b) 60 mm and (c) 76 mm

Fig. 9 The energy conversion ratio (η) for D = (a) 48 mm, (b) 60 mm and (c) 76 mm

Fig. 10 The frequency of Karman vortex shedding (f_v) and the vibration of the DE spring (f) for D = 60 mm and L = 170 mm

Fig. 11 The vibrational component of the DE spring for D = 60 mm, L = 170 mm and U = 0.40, 0.50 and 0.60 m/s

で、円管直径 D が 60 mm、流速 U が 0.50 m/s で翼と円管中心の距離 L が 170 mm の条件であった。このときのエネルギー変換効率 η は約 3.6% となる。そして最も効率 η が高くなった条件は、円管直径 D が 48 mm、流速 U が 0.40 m/s で翼と円管中心の距離 L が 170 mm で約 5.6% であり、このときの想定される出力 P は約 11.6 mW であった。

ここで高い出力 P を得た条件における DE バネの運動に注目した。Fig. 10 は円管直径 D が 60 mm、翼と円管との距離 L が 170 mm のときの各流速 U に対する実験により得られた DE バネの振動数 f と (5) 式より得られる渦の発生周波数 f_v を示したものである。 f はプロットで f_v は直線で表されている。流速 U が 0.60 m/s 以下では f と f_v がよく一致し、DE バネの駆動力が渦の圧力から起こっていることを意味する。 U が 0.60 m/s を超える範囲では、円管後流の乱流成分が強くなるため翼の振動が不安定になり f が f_v に対して小さくなったと推測する。この影響を見るために円管直径 D が 60 mm、翼と円管との距離 L が 170 mm、流速 U が 0.40, 0.50 及び 0.60 m/s における DE バネのストローク x とその振動成分を Fig. 11 に示す。各流速 U での振動がどのような振幅 x で構成されているのかを棒グラフにて表しており、緑が U = 0.40 m/s、青が U = 0.50 m/s、赤が U = 0.60 m/s を示している。いず

れの振動もある一定の振幅を持たずに複数の振動成分で構成されていることがわかる。流速 U が 0.40 m/s のとき、DE バネは約 1.2 Hz で振動し (Fig. 10)、その約 6 割が 4 mm の振幅 x で残りの約 4 割が主に 3 mm と 5 mm の振幅 x である。流速 U が 0.50 m/s のときでは振動数 f が約 1.7 Hz で (Fig. 10)、6 mm と 7 mm の振幅 x がそれぞれ約 4 割を占め、あとの約 2 割を 5 mm の振幅 x により DE バネの振動が構成されている。 U が 0.60 m/s になると DE バネのストローク x が小さくなり、1 ~ 5 mm の振幅で f = 2.1 Hz の振動となる。流速が上がると円管後流で乱流の影響が強くなるために翼の振動が不安定になったと考えられ、したがって Fig. 8b に示したような出力のピークが現れ、 U が 0.60 m/s を超える範囲で f が f_v に対して小さくなった (Fig. 10)。

以上の実験結果より、翼が円管に近いとき翼と DE バネの振動は渦が十分に発達していないため不安定にあり、翼が円管から遠いときには粘性抵抗により渦が弱くなり翼と DE バネの振動振幅が小さくなる。そして、流速が上がると乱流成分が強くなり翼と DE バネの振動数もしくはストロークが低下するため、本機構では出力がピークになる流速と翼と円管距離の最適な条件が存在する。

5. 結 言

本研究にて我々は誘電エラストマーという新しいトランスデューサ技術を利用しカルマン渦により駆動する小型水力発電システムを提案した。そして、その実現性や性能を評価するためにモデルを作製し実験を行い、以下の結論を得た。

- (1) 直径 80 mm の誘電エラストマーを利用した発電機は本機構においてカルマン渦によりうまく駆動し、新しい小型水力発電の可能性が示された。
- (2) 本発電システムで高いエネルギー変換効率を得る為には流速に対応した円管直径ならびに翼と円管との距離を選択する必要がある。
- (3) 流速が 0.40 m/s, 円管直径 48 mm, 翼と円管中心との距離が 170 mm で想定される効率が最大となり、約 5.6% を示した。
- (4) スパン長 120 mm, コード長 30 mm の翼を用い、円管直径が 60 mm, 翼と円管距離を 170 mm, 流速を 0.50 m/s に設定することで、約 16.3 mW の最大平均出力が約 3.6% の効率で期待できる。

謝 辞

本研究は JSPS 特別推進研究 25000012, JSPS 若手研究(A) 24686018, JSPS 挑戦的萌芽研究 26630009 の助成を受けたものです。

文 献 : References

- 1) REN21, Renewables 2011 Global Status Report, Paris: REN21 Secretariat, 2011
- 2) Wang, D. A.; Chiu, C. Y.; Pham, H. T., *Mechatronics*, **22**, 746-756 (2012)
- 3) Nguyen, H. D. T.; Pham, H. T.; Wang, D. A., *J. Wing Eng. Ind. Aerodyn.*, **116**, 40-48 (2013)
- 4) Pelrine, R.; Chiba S., Proc. of Third International Symposium on Micromachine and Human Science, Nagoya, Japan, 1-9 (1992)
- 5) Osada, Y.; Taguchi, T., Soft Actuators which Drive Future Technologies –Recent R&D Activities Focused on Polymers and Biomaterials–, CMC Publishing CO., LTD., 2010 : 長田義仁, 田口隆久, 未来を動かすソフトアクチュエーター高分子・生体材料を中心とした研究開発一, CMC 出版, 2010
- 6) Asaka, K.; Okuzaki, H., Soft Actuators: Materials, Modeling, Applications, and Future Perspectives, Springer, 2014
- 7) Pelrine, R.; Kornbluh, R.; Joseph, J.; Heydt, R.; Pei Q.; Chiba S., *Materials Science and Engineering*, **C11**, 89-100 (2000)
- 8) Chiba, S.; Pelrine, R.; Kornbluh, R.; Prahlad, H.; Stanford, S.; Eckerle, J., *J. Jpn. Inst. Energy*, **86**(9), 743-747 (2007) : 千葉正毅, ロン・ペルライン, ロイ・コーンブル, ハーシャ・プラード, スコット・スタンフォード, ジョセフ・エカリー, 日エネ誌, **86**(9), 743-747 (2007)
- 9) Chiba, S.; Waki, M.; Kornbluh, R.; Pelrine, R., Proc. SPIE 6524, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD), 652424, 1-5 (2007)
- 10) Chiba, S.; Waki, M.; Kornbluh, R.; Pelrine, R., Proc. SPIE 6927, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD), 692715, 1-9 (2008)
- 11) Chiba, S.; Waki, M.; Wada, T.; Hirakawa, Y.; Masuda, K.; Ikoma, T., *Applied Energy*, **104**, 497-502 (2013)
- 12) The Japan Society of Fluid Mechanics, Handbook of Hydrodynamics, 2nd ed., Maruzen, 1998 : 日本流体力学学会, 流体力学ハンドブック, 第2版, 丸善, 1998