

磁歪材料を用いた振動発電デバイスによる 波浪エネルギー利用に関する研究

Ocean Wave Energy Utilization using Magnetostrictive Vibrational Power Generator

齋藤武久¹・我妻純平²・上野敏幸³・北 翔太⁴

Takehisa SAITOH, Junpei WAGATSUMA, Toshiyuki UENO and Shota KITA

New method for ocean wave energy utilization is presented instead of conventional wave energy utilization way using OWC (Oscillating Water Columns) with air turbine or another convertor and vibrational power generator using piezoelectric materials. Magnetostrictive vibrational power generator is used as new energy harvesting system. This vibrational power generator device consists of Galfenol combined with iron yokes, coils, and a bias magnet, has advantages from the viewpoint of size, and efficiency, and it is extremely robust and has low electrical impedance comparing with the device using piezoelectric materials. Fundamental characteristics on electric power energy generated from this device are discussed using the experimental data on the electric power energy obtained from regular and irregular wave experiments.

1. はじめに

波浪エネルギーは化石燃料に代わる次世代エネルギーとして我が国で先駆的にその利用に関する研究開発が進められてきた再生可能エネルギーの一つである。その利用方法に関しては、OWC (Oscillating Water Columns) に代表される空気タービンを利用した波浪エネルギー変換デバイスを用いたものが代表的であり、我が国での開発を契機に現在ではヨーロッパ特にイギリスでの実用化が進んでいる。ただし、オリジナルの波浪エネルギーを複数の変換過程を経て電力を引き出すこのシステムで、エネルギー変換に伴うエネルギー損失が大きいこのため、変換に伴うエネルギー損失の少ないデバイスの開発は将来の再生可能エネルギーの効率的な利用促進への鍵であり多くの研究が行われている (例えば、近藤ら、1996; NEDO, 2014)。

特に最近では、従来の防波堤や浮体構造物内における流体あるいはそれに伴う空気流を介したエネルギー変換デバイスに代わった新たな発電デバイスを利用した波浪エネルギー利用の試みが行われている。例えば、陸田ら (2009) は波動運動に追従した柔軟圧電材料の変形から電力を獲得する弾性圧電デバイスを用いた波エネルギー利用の研究に着手し、海洋域 (陸田ら、2010a, 2013b) および沿岸域 (陸田ら、2010b, 2013a) での利用を精力的に進めている。一方で、柔軟圧電材料を用いた発電方式などに見られる材料への周期的な加圧による発電機構

は、エレクトレット、可動磁石 (電磁誘導) などの振動発電に分類されるが、発電効率や耐環境性が高いとは言い難い。また、圧電素子は脆性材料で曲げや衝撃への耐久性が弱く、発生電圧は高いが低周波数域で負荷より取り出せる電力が小さくなる特徴がある (Ueno and Yamada, 2011)。

これに関連して、著者の一人 (上野・山田, 2011) は、鉄ガリウム合金磁歪材料 (Clark et. al., 2000, 2002) を用いた振動発電技術を提案している。この材料の大きな特徴は材料が延性材料であり、外力に対して非常に強く良好な加工性を有していること、さらに、最大1T以上も磁束密度が変化することが挙げられる (Ueno and Higuchi, 2007)。本研究ではこの磁歪材料を用いた発電デバイスを高周波アップコンバータ化 (上野ら, 2013) により波浪エネルギー利用に向けた改良した著者らの基礎的研究 (北ら, 2013) を発展させ、規則波および不規則波を作用させた場合の発電容量について実験的に考究する。

2. 磁歪材料を用いた振動発電デバイスの構造および発電原理

振動発電機の構成および発電の原理を図-1 (a) および図-1 (b) に示す (上野ら, 2013)。発電機はコイルを巻いた板状の磁歪素子とヨークの平行梁構造を基本とし、この側面に永久磁石が配置されたものである。ヨークは平行梁を構成する梁と固定部、可動部が一体で成形されたもので、磁歪素子の両端はこのヨークの中央部に強固に接合される。また磁石の起磁力により素子内には適度なバイアス磁束が通っている (図-1 (a))。

磁歪材料は磁界を印加すると形状が伸縮変化する性質 (磁歪効果) と、逆に、磁性体に応力を加えると内部の

1 正会員 博(工) 金沢大学教授 環境デザイン学系
2 金沢大学大学院 環境デザイン学専攻
3 博(工) 金沢大学准教授 電子情報学系
4 金沢大学大学院 電子情報学専攻

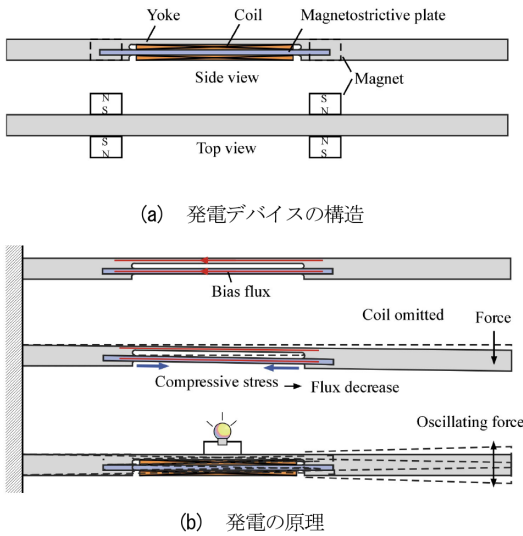


図-1 実験模型の設定と計測機器の配置(上野ら, 2013)

磁束密度が変化する性質(逆磁歪効果)を示す材料で、本研究では逆磁歪効果を利用して発電を行う。その発電の原理を図-1 (b) に示すが、例えば発電機を片持ちで固定し、可動部に上向きの曲げ力を加えると、発電機は湾曲し、磁歪素子内部には引張力が作用する。この時、素子内の応力は平行梁内で一様で、逆磁歪効果により磁化が増加する。逆に、下向きの力を加えると、圧縮力が作用し磁化は減少する(図-1 (b) 中段)。この曲げ力を振動で与えることで、素子内の応力ひいては磁化が交番状に変化し、電磁誘導でコイルに起電力が発生する(図-1 (b) 下段)。

磁歪素子には鉄系の磁歪材料Galfenol (Fe81.6Ga18.4)を用いるが、これにより発電機は全体が鉄をベースにした構造となり耐久性が高くとれる。またGalfenolの大きな逆磁歪効果と、力を拡大する平行梁構造の組み合わせにより効率の高い発電が行われる。

なお、一例として行った発電機の評価結果は以下のようである。発電機は $2 \times 0.5 \times 22 \text{mm}^3$ の板状のGalfenol(応力焼きなまし処理)に、線径 0.05mm 、1810ターン(120 Ω)のコイルを巻き、これを $2 \times 2 \times 39 \text{mm}^3$ (可動部13mm、平行梁部16mm、固定部11mm)のSUS430ヨークに接合した場合である。平行梁部のヨークは厚さが 0.5mm 、磁歪素子との空隙は 0.5mm である。バイアス用永久磁石として $2 \times 3 \times 2 \text{mm}^3$ のNd-Fe-B磁石4個を用いた。この発電機を加振機に片持ちで固定し、一次共振周波数の348Hz、振動加速度10Gで強制加振した時の時間応答を図-2に示す。この時、可動部先端はおおよそ2mmの振幅で変位し、最大5Vの開放電圧が発生する。図-3は加振周波数と発生電力の関係を測定した結果である。電力は倍電圧整流回路にて電圧を直流化し、これに抵抗負荷($R = 1486 \Omega$)を

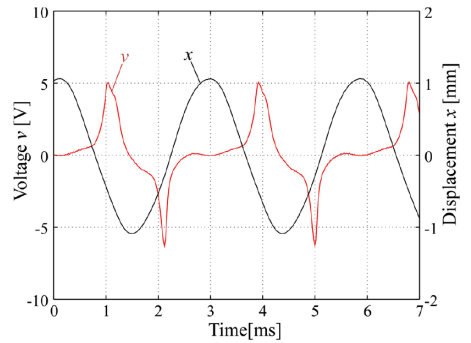


図-2 発電機を加振機に片持ちで固定し強制加振した時の時間応答(一次共振周波数348Hz、振動加速度10G、上野ら, 2013)

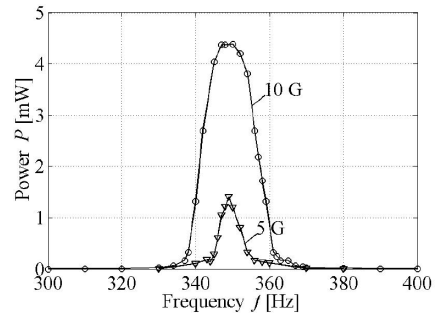


図-3 加振周波数と発生電力の関係(上野ら, 2013)

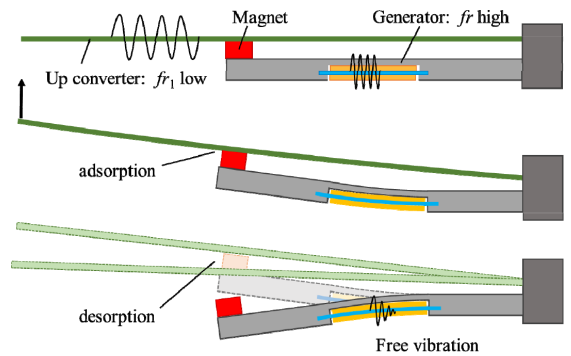
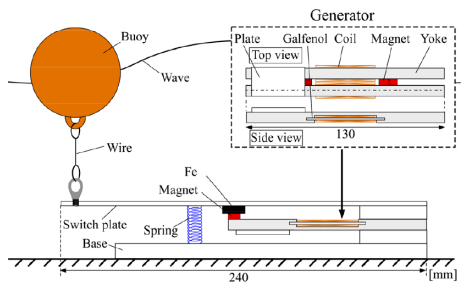
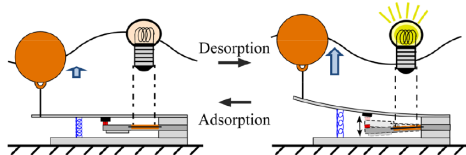


図-4 周波数アップコンバータの概念図

繋いだときのジュール損で計算した。10Gの加速度で、共振周波数の350Hz付近にて、最大4.3mWの電力が得られる。なお、この発電機ではQ値が高く、圧電材料や磁石を振らせる一般的な振動発電機と同様に、周波数が共振点から外れると発電量が著しく低下する。ただし、一般に振動発電の高出力化には、高周波の振動を利用するのが望ましいため、本研究では図-4に示すような、自然界での日常的な低い周波数で自由振動を励振する周波数アップコンバータを採用する。これは低い周波数の共振系と発電機を組み合わせ、低い共振系への外力が、発電機に過渡的な力を作用させることで自由振動を発生させ



(a) 発電機の概要



(b) ブイの上下動に伴う発電のタイミング

図-5 本研究で用いる振動発電デバイス(北ら2013)

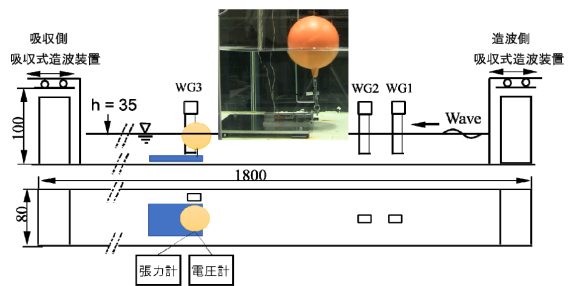


図-6 実験水槽の概要

でブイと梁を連結する係留鎖にはたわみが無いようにブイの鉛直方向重心位置を適宜調整可能となるが、今回の実験ではブイの重心位置は静水面位置よりも若干上側に調整している。本研究では、発電素子部の固有振動を波浪による水面の上下変動に連動したブイ（直径24cm最大浮力は6.6Kgf（64.7N））が連結する梁の磁石からの脱着で実現するため、梁の磁石からの脱着をいかに実現させるかが効率的な発電のポイントとなるが、予備実験より磁石からの脱着が可能となる張力はブイの鉛直方向移動の場合におおよそ2.9kgf（28.4N）を超える場合であった。出現電位差の計測には負荷として200Ωの抵抗を結線して行っている。

4. 規則波および不規則波を作用させた場合の振動発電デバイスの発電特性

図-7に振動発電デバイスに規則波（ $H=7.3\text{cm}$, $T=2.0\text{s}$ ）を作用させた場合のブイの移動の様子を示す。図中 $t=t_0$ は水面がゼロアップクロスする付近の時刻を表す。図より、振動発電デバイスへの波峰の進入に伴って（図中（a）、（b）、（c））、ブイは波の進行方向および水面の上昇方向と静水状態が合成された方向へ移動し、波頂部の通過（図中（d））から波谷に至る（図中（e）、（f）、（g）、（h））以降は波の後退方向と水面の下降方向との合成方向への移動が確認できる。このとき、デバイス設置位置

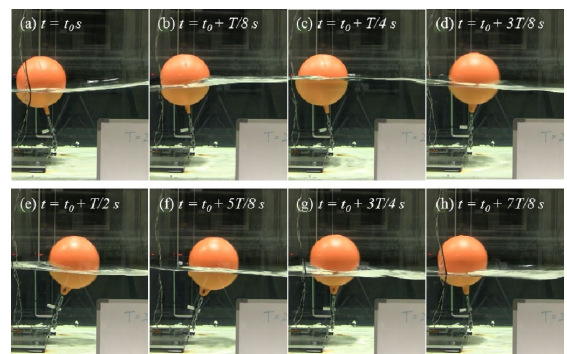
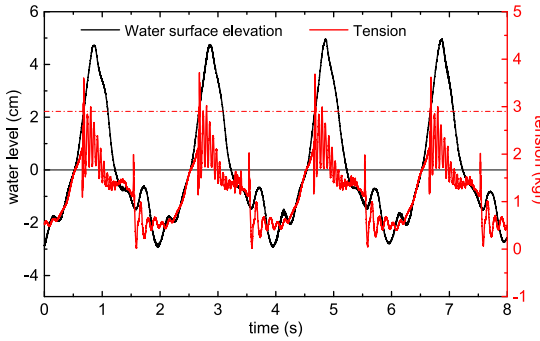


図-7 デバイス付近での波の進行に伴うブイの運動の状況($H=7.3\text{cm}$, $T=2.0\text{s}$)

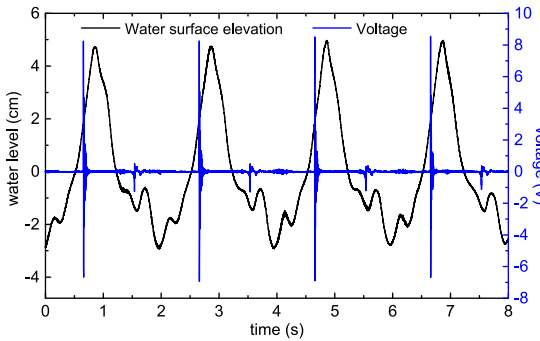
るものである。過渡的な力を与えるのに、例えば永久磁石を利用する。磁石の吸引力はギャップが小さい領域で大きく変化し、その吸脱着時には力がステップ状に変化する。これを用いて低い周波数の動きが、発電機の高い共振周波数振動 f_r に変換され、効率のよい発電が期待できる。本研究では、上述の外力として波動場に係留されたブイの上下振動を誘発する浮力および変動波力を想定した図-5に示す振動発電デバイス（北ら、2013）を用いる。なお、発電素子は長さ130mmの大きさであり、鉄ガリウム合金は $1.5 \times 7 \times 50\text{mm}^3$ 、コイルは1606ターン（120Ω）のものを用いている。この発電素子を2個用いて発電部端部中央に永久磁石（Nd-Fe-B, 224mm^3 ）を配置することにより、この磁石による起磁力で磁石・ヨーク・磁歪板で構成される閉磁路内を適度なバイアスで磁束を還流する。なお、逆磁歪効果を利用した発電としては超磁歪材料（Tb-Dy-Fe合金）に軸力を加えるタイプがあるが（Eda et. al., 1997）、本研究で用いる発電素子は、シンプルな構造で格段に小さく、より小さい力の微小振動で発電を行うことが可能となっている。

3. 実験装置および実験方法

図-6に実験装置の概要を示す。実験には、両端に吸収式造波機が装備された長さ18m、幅80cm、高さ1mの2次元造波水槽を用いた。水深 $h=35\text{cm}$ のもので水槽中央部に振動発電デバイスを設置し、規則波（入射波高 $H=5.2 \sim 12.8\text{cm}$ 、周期 $T=1.5 \sim 3.0\text{s}$ ）および規則波の諸元が有義値となるプレットシュナイダー・光型型スペクトルを有する不規則波を作用させて、デバイス設置位置での水位変動およびブイに作用する張力および出現電位差をサンプリング周波数2kHzで同時計測した。なお、静水状態

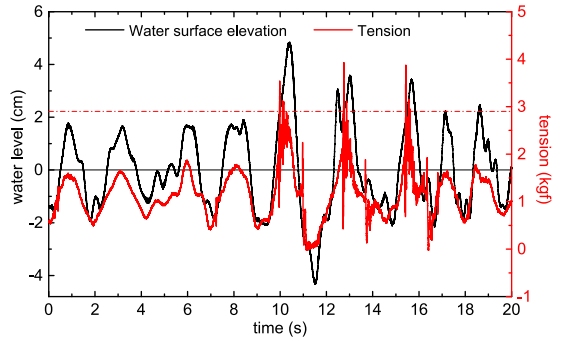


(a) 発電デバイス位置での水位とブイに作用する張力の時間変化

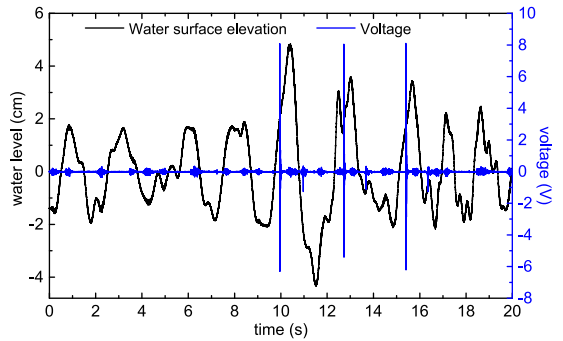


(b) 発電デバイス位置での水位と出現電位差の時間変化

図-8 規則波を作用させた場合の発電機位置での水位、ブイに作用する張力、出現電位差の関係 ($H=7.3\text{cm}$, $T=2.0\text{s}$)



(a) 発電デバイス位置での水位とブイに作用する張力の時間変化



(b) 発電デバイス位置での水位と出現電位差の時間変化

図-11 不規則波を作用させた場合の発電機位置での水位、ブイに作用する張力、出現電位差の関係 ($H_{1/3}=5.5\text{cm}$, $T_{1/3}=2.0\text{s}$)

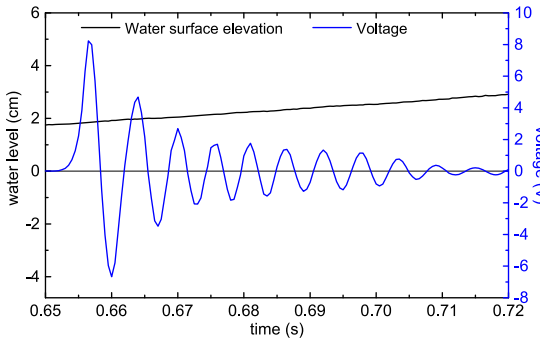


図-9 発電デバイス位置での水位と出現電位差の時間変化(図-8 (b)の時間軸を拡大して表示)

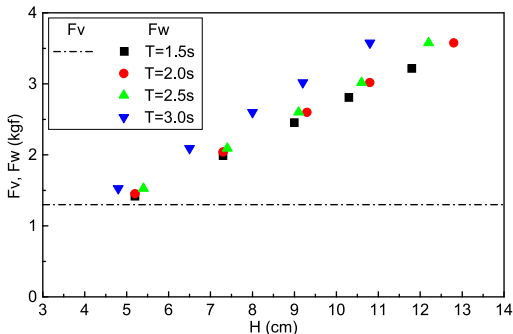


図-10 ブイに作用する浮力と変動波力との関係

での水位、ブイに作用する張力および出現電位差の時間変化特性を図-8に示すが、デバイス付近の水位の上昇に伴って浮体への浮力および鉛直方向変動波圧が増加し、係留鎖に作用する張力が2.9kgfへ到達後、発電素子の自由振動に伴う減衰振動的な発電の発生が図-9の拡大図より確認できる。なお、ブイの体積が等しくなる固定矩形浮体を対象として、浮体に作用する浮力 F_v および鉛直方向変動波力 F_w の理論値との関係を図-10に示すが、水面付近では F_w の値が比較的大きい。このことは、図-8 (a)で僅かな水面上昇の発生後に磁石から脱着に伴う発電の発生に対応している。

次に、不規則波を作用させた場合の結果を図-11に例示 ($H_{1/3}=5.5\text{cm}$, $T_{1/3}=2.0\text{s}$)する。発電デバイス付近の水位が比較的大きな場合、規則波の場合と同様に水位上昇に連動した発電が頻繁に確認されるが、不規則な浮体運動に起因することが考えられるが十分な発電に至らない場合も見られる。

今回の実験で一回の発電時(例えば図-9の電位差の時間変化で $t=0.65\sim 0.72\text{s}$ など)に取得できる発電容量を入射波の違いで整理した結果を図-12に示す。図より、一回の発電時の発電容量は入射波高の増加に伴って若干の増

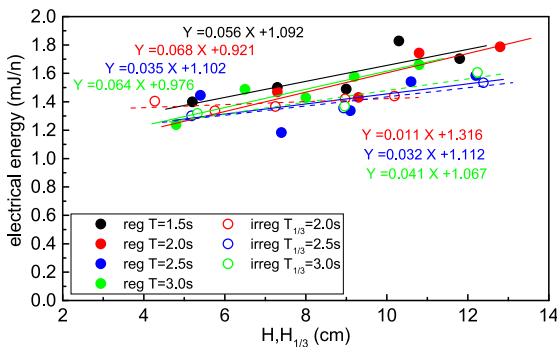


図-12 入射波高の変化に伴う一回の発電で取得できる発電容量の変化特性

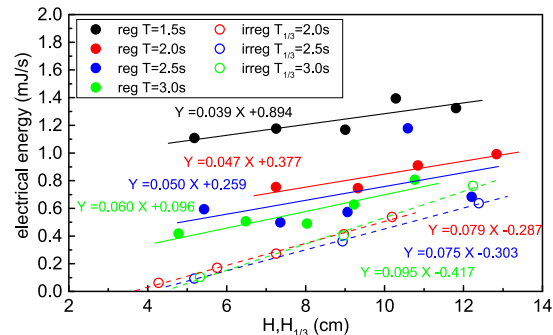


図-13 入射波高の変化に伴う単位時間当たり発電で取得できる発電容量の変化特性

加傾向がみられるものの周期の変化に関わらずほぼ一定となっている。一方、図-13に単位時間当たりの発電容量特性を整理した結果を示す。対象期間における水面変動の周波数に発電回数は比例するため、短周期波ほど発電効率は高くなっている。なお、今回の実験範囲で最大の発電容量は1.4mJ/sであり、発電時の電位差計測に用いる抵抗値にも依存するが、従来の柔軟圧電材料を用いた場合(陸田ら, 2009)に得られている値を上回る高い発電容量が獲得されている。

なお、入射波高および周期特性の変化が発電素子部の磁石からの脱着時の振動特性に及ぼす詳細な特性については現在検討を進めている。

6. 結論

本研究では、磁歪材料を用いた振動発電デバイスへ規則波および不規則波を作用させた場合の発電特性を実験的に考究した。以下に本研究で得られた結果を要約する。

本研究で用いた振動発電デバイスへ波浪を作用させた場合、発電素子への固有振動を誘発して発電が可能となることを実験的に確認した。なお、本研究の実験範囲では最大で1.4mJ/sの発電が可能となることが分かった。

本システムへ規則波を作用させた発電実験では、入射

波の周期に応じた1回あたりの発電量は入射波高の増加に伴って、わずかながら増加する傾向が見られた。ただし周期の変化に伴う明確な違いは見られず、単位時間あたりの発電効率は周期が短い場合により効率的になる。また、規則波の入射波高および周期と等値な有義波高および有義波高を有する不規則波を作用させた場合の単位時間あたりの発電量は入射波高の増加に伴って規則波の場合に近づくことが分かった。

参考文献

- 上野敏幸・山田外史 (2012) : 磁歪材料を用いた小型振動発電素子の特性評価, 日本AEM学会誌, Vol.20, No. 1, pp. 168-173.
- 上野敏幸 (2012) : 磁歪式振動発電の高次共振モードにおける発電特性, 日本機械学会2012年度年次大会講演集in CD-ROM.
- 上野敏幸・河出卓也・山田外史 (2013) : 磁歪式振動発電の周波数アップコンバータによる広周波数帯域化, Dynamics and Design Conference 2013講演論文集in USB Flash Drive.
- 北 翔太・上野敏幸・山田外史 (2013) : 磁歪材料を用いた波力発電システムの基礎的研究, 第25回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム講演論文集, pp. 200-201.
- 近藤俊郎・木方靖二・谷野賢二・上原春男・宮崎武晃 (1996) : 海洋エネルギー利用技術, 森北出版, 185 p.
- NEDO : NEDO再生エネルギー技術白書, http://www.nedo.go.jp/library/ne_hakusyo_index.html, 参照2014-05-14.
- 陸田秀実・川上健太・黒川剛幸・土井康明・田中義和 (2009) : 弾性圧電デバイスを用いた波エネルギー利用技術の開発, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 65, No. 1, pp. 1296-1300.
- 陸田秀実・川上健太・平田真登・土井康明・田中義和・柳原大輔 (2010a) : 弾性圧電デバイスを用いた海洋エネルギー利用技術に関する研究, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 66, No.1, pp. 1276-1280.
- 陸田秀実・平田真登・川上健太・土井康明・田中義和・柳原大輔 (2010b) : 弾性圧電デバイスを用いた波浪発電に関する研究, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 66, No.1, pp. 1281-1285.
- 陸田秀実・森崎健一・田中義和・土井康明 (2013a) : 引張・圧縮型柔軟発電デバイスを用いた波浪エネルギー利用方法に関する研究, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp. I_1311-I_1315.
- 陸田秀実・東 翔太・渡邊隆太・田中義和・土井康明 (2013b) : 垂下式弾性浮体ユニット型海洋エネルギー発電方式の発電特性, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp. I_1316-I_1320.
- A. E. Clark, M. Wun-Fogle and J. B. Restorff (2000) : Magnetostrictive Properties of Body-Centered Cubic Fe-Ga and Fe-Ga-Al Alloy, IEEE Trans. Magn., Vol. 37, pp. 3238-3240.
- A. E. Clark, M. Wun-Fogle and J. B. Restorff (2002) : Magnetostrictive property of Gallenol alloys under compressive stress, Mater. Trans., Vol. 43, pp. 881-886.
- H. Eda, H. Nakamura, Y. Yamamoto, Development of the Giant Magnetodtriction Electric Generator Prototype (1997) : Application of the Reverse Magnetostriction Effect, Jpn. Soc. Precision. Eng. Vol. 63, pp. 706-710.
- T. Ueno and T. Higuchi (2007) : Magnetic Circuit for Stress-Based Magnetic Force Control Using Iron-Gallium Alloy, IEEE Trans. Mags., Vol. 43, pp. 2594-2596, 2007.
- T. Ueno and S. Yamada (2011) : Study on Micro-energy Harvesting Device Using Iron-Gallium Alloy, J. Magn. Soc. Jpn., Vol. 35, pp. 88-91.