

水栓設備によるエネルギーハーベスティング技術に関する研究（第1報）

西嶋 隆、田中 泰斗

Energy-harvesting technology for water supply products (I)

Takashi Nishijima, Taito Tanaka

岐阜県の岐阜地区、中濃地区は全国的な水栓バルブの産地であり、平成24年の当県の給排水用バルブ・コックの出荷額は全国のおよそ34.4%の規模である。地場産業である水栓バルブ業界の発展には、より付加価値の高い製品や省エネ機能を付加した環境配慮型の製品開発が望まれている。本研究では、電子デバイスの超低消費電力化や発電デバイス技術に伴い発展してきた「エネルギーハーベスティング（以下EH）技術」（身の回りの環境に分散する未利用エネルギーを電気エネルギーに変換して利用する技術）の動向に注目し、EH技術を導入した付加価値の高い水栓関連の製品の提案を試みる。

1. はじめに

岐阜県の水栓バルブ産業は岐阜地区、中濃地区の代表的な地場産業である。平成24年における「給排水用バルブ・コック」の全国の出荷額は128,851百万円に対し、うち当県における出荷額は44,326百万円であり、全国のおよそ34.4%の規模¹⁾を占める。当県における水栓バルブの生産は数量で全国1位（シェア28.7%）であり、地域を代表する製造業となっている。同業界の発展には、製品の素材や機能面における品質を高く維持しつつ、更なる高付加価値化が望まれている。

当県内に事業所を有する水栓バルブメーカーにおいても、センサや電磁弁を用いた自動吐水機能を付加した製品や、水流による自己発電機能を用いて電磁弁を駆動する、環境配慮志向の製品も開発されている²⁾。今後も更に、新たな価値を創造する製品開発が必要と考えられる。

近年注目されているEH技術は、環境にある未利用の振動、熱、光、電波等のエネルギーを回収し、 $\mu\text{W}\sim\text{mW}$ 程度の小規模な電気エネルギーに変換して利用する技術である。この技術は、近年の電子デバイスの超低消費電力化や、多様な発電素子の技術的な発展により可能となってきた。今後の「モノのインターネット」時代においては、各種センサ類がインターネットに繋がり、ビッグデータとして処理・活用されることが予想されており、EH技術は多数のセンサ端末の電力として、ボタン電池に代わる電源として期待されている。

現在、EH技術の適用分野として、BEMS（ビルエネルギーマネジメントシステム）やHEMS（家庭用エネルギーマネジメントシステム）における、無線センサネットワーク用の自立電源としての活用がある。これは家庭・業務部門における消費エネルギーの増加³⁾を抑制するための適用である。その他にも、老朽化する社会インフラのモニタ用センサ電源としての適用等、社会的課題に対する適用が進められている⁴⁾。今後もEH技術が有

効となる用途開拓や、EH技術のビジネスモデルが確立され、市場が発展していくと期待されている。

本研究では、当県の地場産業である水栓バルブ業界の扱う水栓設備から、水流や熱の未利用エネルギーが得られる点に着目し、前述のような将来的発展が期待されるEH技術を導入した付加価値のある水栓設備の提案を試みる。

2. EH技術動向

2.1 主な研究動向

以下に近年のEH技術関連の主な研究動向を記す。2007年に（独）科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センターにより開催された「希薄分散エネルギー活用技術に関する科学技術未来戦略ワークショップ」において、大学、研究機関、企業で個々に進められている当該技術分野の研究を一つの研究分野として位置づけ、基盤技術の集積や情報交換が効果的であると取りまとめられた⁵⁾。

2006年から2009年にかけては、（独）新エネルギー産業技術総合開発機構とJR東日本コンサルタンツが東京駅の改札口やサッカースタジアムの観客席に発電床を設け実証実験を実施した。この社会実験では圧電素子による発電素子の実利用における耐久性や発電量の知見が得られ、 25m^2 の発電床により1日当り940kW秒の発電、5週間の利用後に95%の発電量を維持する耐久性が得られている⁶⁾。

2010年には、（株）NTTデータ経営研究所を事務局とする国内企業数十社によるエネルギーハーベスティングコンソーシアムが設立され、関係企業の情報共有、共同活動の推進等を行うプラットフォームとして活動しており、市場創造や国際標準化等に向けた取り組みが期待されている⁷⁾。

2011年度～2014年度には、（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構と技術研究組合NMEMS技術研究機構

によって、「社会課題対応センサーシステム開発プロジェクト（グリーンセンサ・ネットワークシステム技術開発プロジェクト;H24年度まで）」が実施され、センサデバイスの無線通信機能、自立電源機能、超低消費電力機能を搭載する革新的センサの開発やそれらを用いた環境計測、エネルギー消費量の見える化を行う研究開発が実施された⁸⁾。

他にも東京大学、オムロン（株）、旭硝子（株）等の産学連携で、「環境発電アライアンス」を設立し、エレクトレット振動発電機の啓蒙普及に取り組んでいる⁹⁾。

EUにおいても、ドイツ、デンマーク、スペイン、フィンランド、オーストリアの研究機関、大学、企業によるコンソーシアムがファンディングする NanoCaTe (Nano-carbons for versatile power supply modules) プロジェクトが 2013 年から 2017 年まで実施され、室温から 100° C で動作するナノカーボン等を用いた熱電発電デバイスの研究、無線通信、センサインタフェース関連の研究が実施されている。学際的には PowerMEMS 国際会議が、国内外で開催され、EH 技術に関する研究も活発になされている。

米国においても、MIT において圧電素子を用いた MEMS デバイスの開発研究¹¹⁾ やジョージア工科大による水圧リップルを利用した圧電素子による発電¹²⁾ 等、数多くの研究が報告されている。

このように、EH 技術を対象とした研究開発が近年盛んに行われている。特にセンサネットワーク用途への応用が有望視されており、省エネルギー分野、社会インフラ維持管理分野、介護看護分野等における社会的課題に対応することが期待されている。

2. 2 発電デバイスの動向

EH 技術で用いられる主なエネルギー源は、振動・水流、熱（温度差）、光、電磁波であり、エネルギー変換デバイスとしては、圧電素子、マグネット・コイル、磁歪素子、エレクトレット、ペルチェ素子、太陽電池、レクテナが代表的である。

圧電素子は、PZT のセラミックス系のもの、PVDF を用いた柔軟な素材のもの、MFC (Micro Fiber Composite) 等が開発されてきており、太陽電池は従来のシリコン単結晶から、色素増感型、薄膜 GaAs 等柔軟に変換効率の高い太陽電池が開発されてきている。

磁歪素子では、米国海軍研究所 (Naval Research Laboratory) で開発された鉄ガリウム合金 (Galfenol) が注目されており、機械特性や加工性の良さ、磁歪定数の高さから、エネルギーハーベスタとしての研究がなされている¹³⁾。

熱を利用した発電デバイスとしては、小規模なものはゼーベック効果を用いたものが代表的であり、その他、スピンゼーベック効果によるもの、有機熱電材料¹⁴⁾ が

開発されている。熱電発電デバイスの製品例としては、(株) KELK 社¹⁵⁾、ヤマハ (株)¹⁶⁾、Micropelt GmbH¹⁷⁾ 製のものなどが知られている。

2. 3 周辺デバイスの動向

EH 技術は、発電素子のみならず周辺電子デバイスの低消費電力化により進展してきた。現在では、EH 用途をターゲットとした DC-DC コンバータ IC が海外メーカー (Linier Technology 社、Texas Instruments 社、Analog Devices 社、STMicroelectronics 社等) から、製品化されるようになった。入力電圧が 1V 未満で動作するものや、最大電力を引き出すための最適動作を自動調整する MPPT (Maximum Power Point Tracking) 機能を有するもの、二次電池に蓄電する機能を有するものも製品化されてきている。

マイクロコンピュータにおいても、動作電流が数十～数百 $\mu\text{A}/\text{MHz}$ 、待機電流が $1\mu\text{A}$ 以下の低消費電力型の製品が販売されており、オペアンプ、コンパレータ、基準電圧 IC においても $1\mu\text{A}$ 以下で動作可能な、低消費電力の電子デバイスが製品化されている¹⁸⁾。

EH 技術による自立電源で動作する無線デバイスとして、電波法で定められた技術基準適合証明のある、EnOcean 無線通信規格や ZigBee 無線通信規格による製品も市販されてきており、これらを利用したセンサネットワークを構築する環境が整ってきている。

3. 水栓設備への適用

本課題の対象とする水栓設備には、水流の運動エネルギーや温水の熱エネルギーがあるため、EH 技術を導入し、より付加価値の高い製品を提供可能である。

その実例として、水流による羽根車から発電し、電磁弁の動力とする製品が知られている。考案レベルではあるが、水流に発生するカルマン渦による振動を用いた発電¹⁹⁾ のほか、水圧リップルにより積層型圧電素子を加振して発電するハーベスタの研究²⁰⁾ も報告されている。

本研究では、現時点で一般的に入手可能なデバイスを利用した軽便な構造の発電装置を試作することを目指し、温水と常温水の温度差を利用した温度差発電をターゲットとした。ペルチェ素子のゼーベック効果による温度差発電を浴室や洗面化粧台に導入する考案として、INAX 社の特許公開²¹⁾ があるが未審査請求によるみなし取下となっている。

3. 1 開発提案

本報では、一般家庭に使われる混合栓（お湯と水を混ぜて温水を出す製品）に「熱水吐出警告機能」を付加する製品を提案し、その可能性を確認する。混合栓に流入する熱水側の温度は一般に約 60°C であり、吐水によるやけどの可能性はある。この点については (社) 日本バルブ工業会において注意喚起が行われている²²⁾。

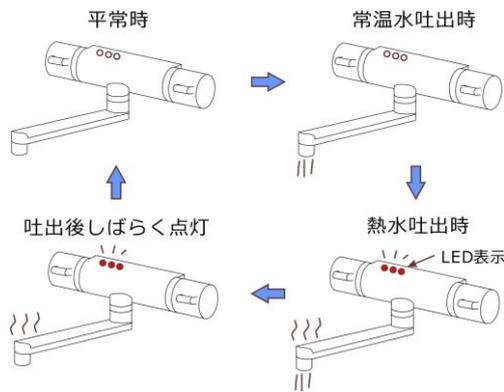


図1 熱水吐出警告表示機能の動作イメージ

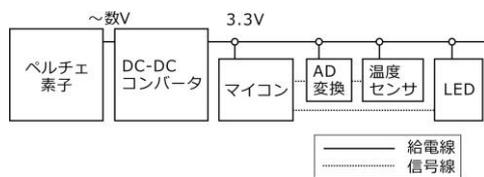


図2 構成図

表1 構成部品

デバイス	型式	メーカー
ペルチェ素子	TEC1-12706	-
DC-DCコンバータ	TPS61200	TI
マイコン	LPC810	NXP
AD変換IC	PCF8591	NXP
温度センサ	S-8120C	SII
LED	OSWT3166B	OptoSupply

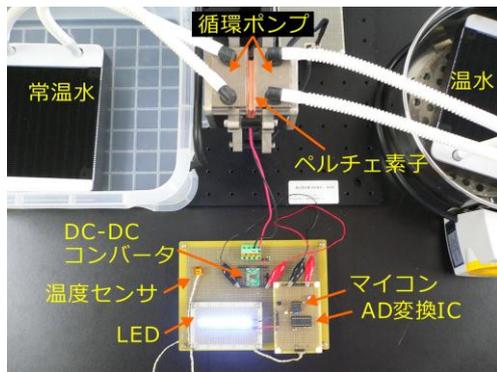


図3 実験の様子

開発案としては、ペルチェ素子を混合栓内に導入し、熱水側と常温水の温度差により発電し、マイコンやセンサを駆動し、吐出水温の計測と水温に応じたLEDの点滅表示を行う。図1に提案する「熱水吐出警告表示機能」の動作イメージを示す。

3.2 構成

本提案を実現するための発電装置の構成図を図2に示す。表1に構成部品を示す。LEDは定電流ダイオードを付加し、10個を並列接続しトランジスタでスイッチングした。

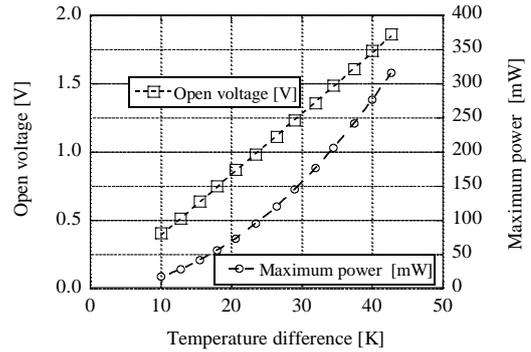


図4 温度差と開放電圧の関係

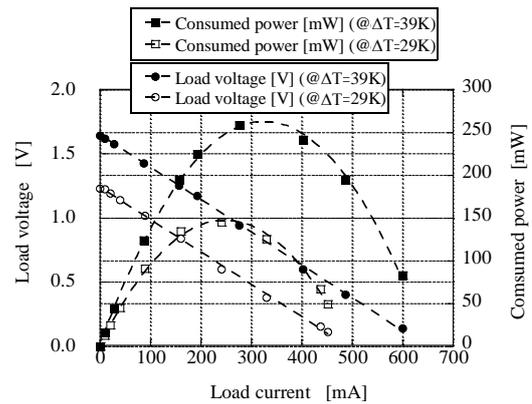


図5 負荷電流、負荷電圧、消費エネルギーの関係 (温度差29K時と39K時)

4. 実験

図3にペルチェ素子に温度差を与えた実験の様子を示す。高温側の温水と低温側の常温水を市販のCPU水冷クーラー(循環ポンプ)によって循環させ、ペルチェ素子の各面を加熱・冷却し温度差を与えた。実験にはペルチェ素子単体(1枚)を用いた。

一般的な混合栓の高温側は約60℃であるため、常温水との温度差は年間を通して、少なくとも最大35K程度は得られると仮定する。

4.1 ペルチェ素子の特性

図4左縦軸は使用したペルチェ素子の温度差と開放電圧である。ここで表した温度差はペルチェ素子表面の温度差ではなく水温の温度差である。結果、温度差 $\Delta T[K]$ と開放電圧 $V_{OPEN}[V]$ は、およそ $V_{OPEN} = 0.04\Delta T$ の関係が得られた。

次にペルチェ素子に負荷(可変抵抗)を接続し、負荷を変えながら、負荷電流 I_L と負荷電圧 V_L を測定し、消費電力を求めた。温度差は29Kと39Kの条件とした。

結果を図5に示す。負荷電圧と負荷電流の関係は線形となり、消費電力が最大の時の負荷電圧は、開放電圧(負荷電流が0の時)の1/2の時となる。

以上を考慮し、図4の温度差と開放電圧の関係と図5の結果から、最大消費電力 P_{MAX} は温度差 ΔT より概算でき、 $P_{MAX} = 173 \times 10^{-6} \Delta T^2 [W]$ となる。この関係を図4の右縦軸に示す。

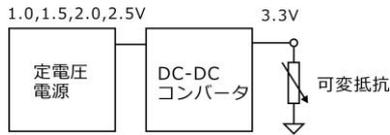


図6 DC-DC コンバータの効率測定時の構成

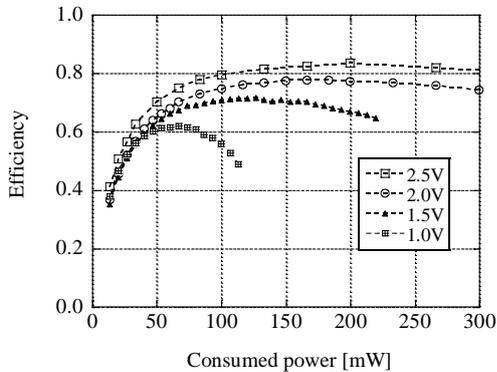


図7 負荷の消費電力と効率の関係

4. 2 DC-DC コンバータの特性

図6に示すように、DC-DC コンバータと負荷を模擬した可変抵抗を用いて、負荷を変化させた時の負荷の消費電力と DC-DC コンバータの効率の関係を実測した。なお DC-DC コンバータの一次側電圧は定電圧源を用いて 1.0、1.5、2.0、2.5V の条件とした。

結果を図7に示す。同図より、DC-DC コンバータの入力電圧が高い程、広い負荷範囲において変換効率が高く、消費電力が少ない領域において効率は低くなる。

4. 3 動作確認

提案する熱水吐出警告は、熱水の温度に応じて LED の点滅速度を変化させる方法とした。また、DC-DC コンバータの負荷となるマイコン・AD 変換 IC・LED 等で構成する負荷の総消費電力は LED のダイナミック点灯等で変動し、最大で約 36mW であった。

試作した回路では、低温側と高温側の温度差が約 17K 以上で動作することを確認した。

この動作状態は DC-DC コンバータの効率が低い状態であるため、今後は発電素子の出力電圧を上昇させることや、温度差が大きい時に余剰電力を蓄電する機能を追加することが有効と考えられる。

5. まとめ

本研究では、岐阜県の地場産業である水栓バルブ製品の 高付加価値化として、近年の EH 技術動向に着目し、入手容易なペルチェ素子や EH 関連の電子デバイスを用いて、混合栓の「熱水吐出警告機能」を提案した。

基礎的な実験として、混合栓の内部の温度領域における、ペルチェ素子の出力特性や DC-DC コンバータの効率を調べ、試作回路を試作し動作を確認した。

今後は EH 関連技術の動向を調査し、水栓バルブ関連

企業との連携を図り、新たな応用についても検討したい。

【参考文献】

- 1) 平成 24 年工業統計表「品目編」データ,経済産業省
- 2) 三栄水栓,自動水栓(発電仕様) 品番 EY506HE-13
- 3) エネルギー白書 2014,経済産業省資源エネルギー庁
- 4) ICT 重点技術の研究開発プロジェクト「スマートなインフラ維持管理に向けた ICT 基盤の確立」,総務省
- 5) 希薄分散エネルギー活用技術に関する科学技術未来ワークショップ報告書, JST 研究開発センター
- 6) NEDO 成果報告書,「エネルギー使用合理化技術戦略的開発/エネルギー使用合理化技術実用化開発/ 駅・建物等における省エネルギーのためのエネルギー変換技術の研究開発」
- 7) エネルギーハーベスティングコンソーシアムホームページ, <http://www.keieiken.co.jp/ehc/index.html>
- 8) NEDO 社会課題対応センサーシステム開発プロジェクト (平成 23 年度～平成 26 年度) http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100021.html
- 9) 環境発電アライアンスホームページ, <http://electret.jp/index-j.html>
- 10) NanoCaTe Project, <http://nanocate.eu/>
- 11) Hajati, Arman, and Sang-Gook Kim, Ultra-wide Bandwidth Piezoelectric Energy Harvesting, American Institute of Physics, Applied Physics Letters 99.8, 2011
- 12) Kenneth A. Cunefare, Hydraulic Pressure Energy Harvesting for Wireless Sensing, Control design, 2014
- 13) Behrooz Rezaeealam, Toshiyuki Ueno and Sotoshi Yamada, Finite Element Analysis of Galfenol Unimorph Vibration Energy Harvester Magnetics, IEEE Transactions on, 48 (11) : 3977-3980 2012-10-18
- 14) (独) 産業総合技術研究所ホームページ, http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2012/pr20120831/pr20120831.html
- 15) (株) KELK ホームページ, <http://www.kelk.co.jp/Company/outline.html>
- 16) ヤマハ (株) ホームページ, http://www.yamaha.co.jp/product/thermoelectric_cooler/
- 17) Micropelt 社ホームページ, <http://www.micropelt.com/index.php>
- 18) トランジスタ技術 2 月号 (2015)
- 19) 特許第 4923245 号,特開 2001-157433
- 20) Kenneth A. Cunefare, Hydraulic Pressure Energy Harvesting for Wireless Sensing, Control Design, 2014
- 21) 特開 2003-070659, 特開 2003-102638
- 22) (社) 日本バルブ工業会, http://www.j-valve.or.jp/suisen/seihin_anzen/yakedo.pdf