

汎用マイコンを用いた海洋発電プラント用の遠隔制御・測定装置の開発

有馬 博史^{*1}, 永田 駿哉^{*2}

Development of remote control and measurement device for ocean energy power plant using general-purpose microcomputer

Hirofumi ARIMA^{*1} and Syunya NAGATA^{*2}

^{*1}Institute of Ocean Energy, Saga Univ., 1-48, Hirao, Kubara-aza, Yamashiro-cho, Imari-shi, Saga 849-4256

^{*2}Faculty of Science Engineering, Saga Univ., 1-Honjo, Saga-shi, Saga 840-8502

Abstract

Internet of things (IoT) technology is rapidly developing because it can perform inexpensive communication control between equipment installed in remote locations. Therefore, it has attracted attention in the ocean energy field. Because ocean energy power generation plants are installed a long distance offshore in many cases, they require investment in remote control and measurement technologies for operation. However, control/measurement equipment can be built by merging simple IoT devices, and many IoT devices have a telecommunication functionality. Therefore, IoT devices are considered suitable for simple use as control/measurement equipment in ocean power plants. In this research, control/measurement equipment was built by merging simple commercial IoT devices to evaluate its performance in offshore ocean thermal energy conversion. A simplified power plant model was controlled and measured using the built IoT devices. The IoT device could control the pump power and switches on the simplified power plant model using simple programs on the device. The voltage of the motor controller, and the flow rate and temperature of the simplified power plant model were also measured using the device, and the results are reported herein.

Key words : IoT, Microcomputer, Ocean energy power plant, Remote control, Remote measurement

1. 緒 言

海洋温度差発電 (OTEC), 波力発電, 海流発電, 洋上風力発電などの海洋エネルギーの発電プラントは, 洋上に浮体に発電機器を設置して発電を行う。それらの発電プラントからの電力は, 主に海底ケーブルを用いて陸上まで送電される(長谷川ら,2010)が, 併せて監視や制御に用いる信号線についても同一の経路で配線される場合が多い。ところで, これらのプラントは例えば洋上風力発電の場合, 離岸距離が沿岸部から沖合に 10km ~ 22.2km 以上 (電力中央研究所,2019) 離して設置する必要がある, また, 波力発電や海流発電については海流の流れが強い地点がもともと陸地から数 km 離れているため, 送電距離が長くなる。そのため, ケーブルも必然的長くなる。一方, プラントのメンテナンスについても船舶による移動に限られてくるので, コストがかかってしまう。これらのことから, 監視及び制御については最低でも無人での操作が可能な装置の設置は必要不可欠となる。ところで, OTEC の分野においては, 洋上や遠隔地での運転を想定して, 後藤ら(2016), 江頭ら(2012,2015)によって遠隔制御についての研究が行われている。その中で, OTEC クライアントの Web ブラウザ上で表示する遠隔監視 Web アプリケーションの開発が行われ, 遠隔からの制御に成功している。一方, 遠隔制御・測定の機器は非常に高価である。遠隔制御測定装置としては, PLC (Programable Logic Controller) を中心に, 測定用センサー群, 被制御機器で構成される。そのうち, PLC は CPU に通信用, デジタル I/O, アナログ I/O ユニット他を自由に構成でき, 被制御機器の数の大小で価格も左右される。このことから, プラントの低コスト化の方法の一つとして, PLC による制御に代わり, 汎用マイコンによる制御について使用可能性の検討を行うことにした。本研究では, その検

原稿受付 2022年11月24日

^{*1} 佐賀大学海洋エネルギー研究所 (〒849-4256 佐賀県伊万里市山代町久原字平尾 1-48)

^{*2} 佐賀大学理工学部 (〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町 1 番)

E-mail of corresponding author: arima@ioes.saga-u.ac.jp

証のとりかかりとして、汎用マイコン 2 種類と 3 種類のセンサーおよび、OTEC プラントを模した被制御・測定機器を組み合わせた、比較的の小規模な制御・測定機器を提案し、それらを用いた制御測定プログラムの構築及び簡易的な制御測定の実験を行った。本報ではその結果の報告を行う。

2. 記号

E_{AD}	:	A/D コンバーター入力電圧	[V]
E_{MC}	:	ポンプ入力電圧 (= モーターコントローラー出力電圧)	[V]
Q	:	体積流量	[L/min]

3. 実験

3・1 実験装置 (ハードウェア)

実験に用いた制御・測定装置の構成を図 1 に示す。実験装置は汎用マイコン 1 (PSoC5LP), 汎用マイコン 2 (Raspberry Pi3), I2C モジュール群, 被制御・測定機器で構成される。また, 図 2 には, 実験装置の検証の対象となる被制御・測定機器も含めた実験装置の構成図を示す。被制御・測定機器は, 図 3 に示す水タンク, ポンプ (マリンテック社製水中ポンプ, max 15L/min), 体積流量計 (キーエンス社製 FD-Q10C, max 30L/min), ポンプ用モーターコントローラー (DROK 社製 DC モーターコントローラー, 0-5VDC 入力, 0-12V 出力), 熱電対で構成される水循環装置であり, これらの被制御・測定機器は後述の I2C モジュールに接続されている。

I2C モジュールは, D/A 変換器 (MCP4725), A/D 変換器 (ADS1115), 熱電対アンプ (MCP9600), 温度センサー (ADT7410), I/O (MCP23017) の 5 種類のモジュールを使用した。D/A 変換器 (MCP4725) は, モーターコントローラーに汎用マイコン 1 から制御用電圧(0~5V)を与える。A/D 変換器はモーターコントローラーに送られる制御電圧および流量計からの電圧値を測定, 熱電対アンプには K 型熱電対を接続して水温測定, 温度センサーは室温を測定し, その値を汎用マイコン 1 に送る。I/O はモーターコントローラーとパイロット用 LED の ON/OFF を行う。

実験装置では, 図 1 および 2 に示すように汎用マイコン 1 (PSoC5LP), 汎用マイコン 2 (Raspberry Pi3) が制御・測定の中核の装置となる。汎用マイコン 1 は被制御・測定機器が繋がれた I2C のモジュールとの間で制御および測定データの送受信を担当する。また, 汎用マイコン 2 (Raspberry Pi3) は汎用マイコン 1 とクラウド(本実験ではローカルの Web サーバーで代用)との間で通信を担当する。一方, I2C センサーは汎用マイコン 1 に接続され, 組み込まれたプログラムによって制御される。

一方, 水循環装置では, 水タンクに貯水された水をポンプで汲み出し, それを再び水タンクに戻すことで水を循環させる単純な装置である。ポンプの出力は制御・測定装置からモーターコントローラーを介して制御され, また, それによって変化する水の体積流量を水の循環経路の途中に設置した体積流量計によって測定する。また, 水温については K 型熱電対で測定した。

3・2 実験装置 (ソフトウェア)

制御及び測定データの流れおよび各機器で用いたプログラムのフローを図 4 に示す。OTEC プラントを模した被制御・測定機器で測定された電圧値 (モーターコントローラーの制御電圧値および体積流量計の電圧出力値), 室温, 熱電対の測定値は, 汎用マイコン 1 に I2C プロトコルの電気信号で送られる。汎用マイコン 1 は FPGA であり, C++ 言語でプログラムされている。次に, 汎用マイコン 1 からのデータはバイナリデータとして USB 通信で汎用マイコン 2 に一旦送られる。汎用マイコン 2 は ARM CPU が組み込まれた小型 PC であり, Visual C# で作られたプログラムが動作している。図 5 に汎用マイコン 2 の送受信データのモニター画面を示す。モニター画面では, I2C モジュールである A/D コンバーターから汎用マイコン 1 経由で送られてきた電圧データおよび D/A コンバーターに送る制御用の電圧データが数秒間隔で表示される。汎用マイコン 1 から送られてきたバイナリデータは Visual C# のプログラムでテキストデータ成形された後に Ethernet 経由で Web サーバー (クラウドの代用) に送信される。データは Web ブラウザで閲覧, 保存するブラウザ表示のためのプログラムは PHP および HTML 言語で組まれている。

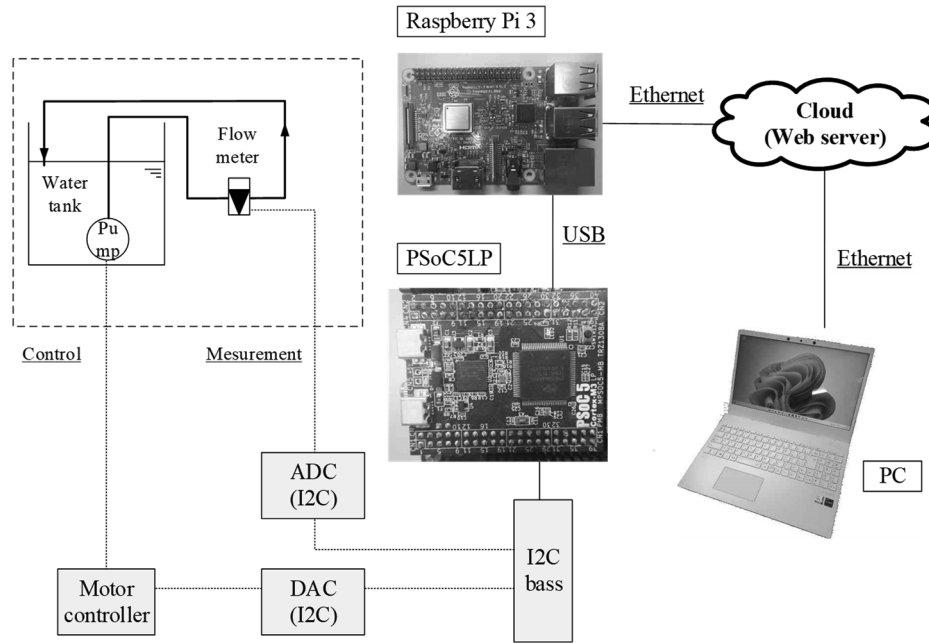


Fig. 1 Hardware configuration of remote control and measuring system.

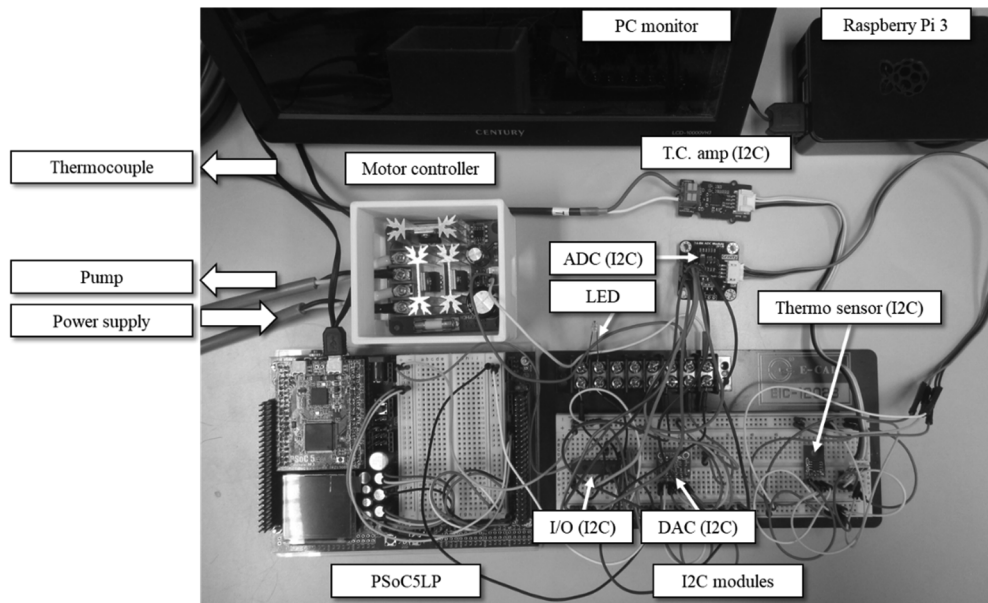


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus.

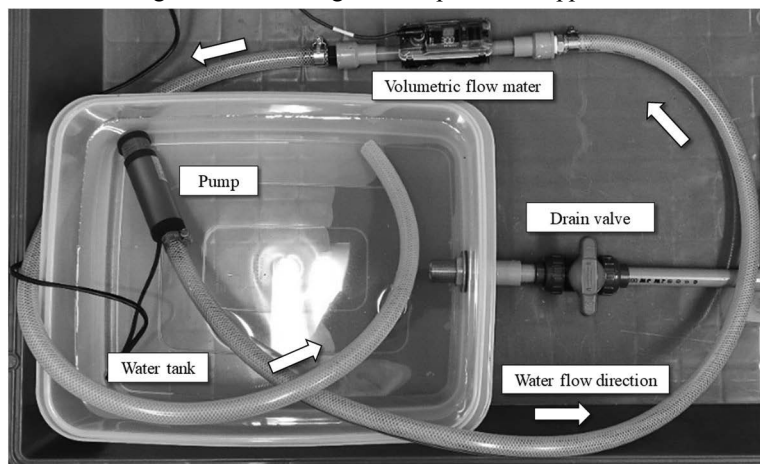


Fig. 3 Schematic diagram of water circular system for control and measurement test.

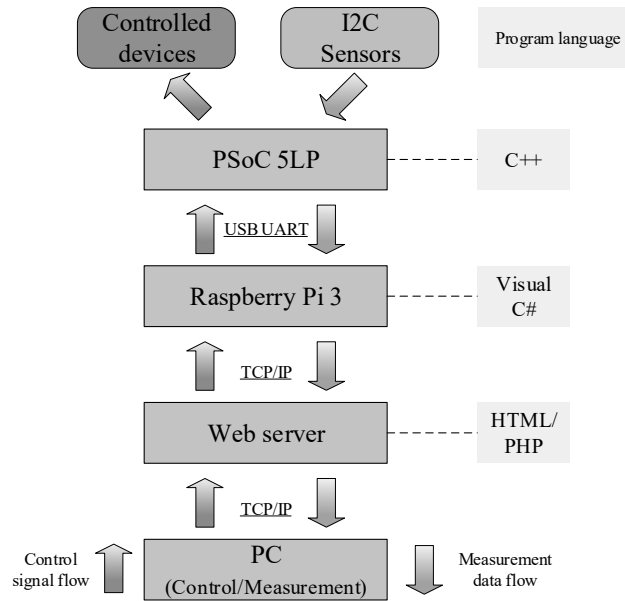


Fig. 4 Data flow and program languages.

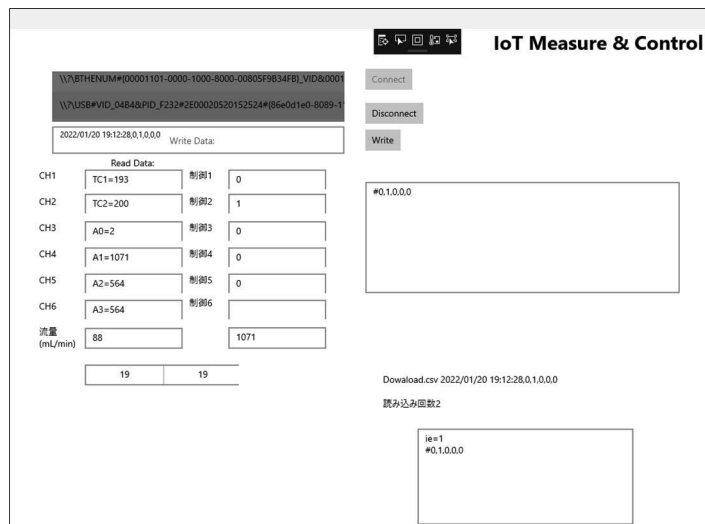
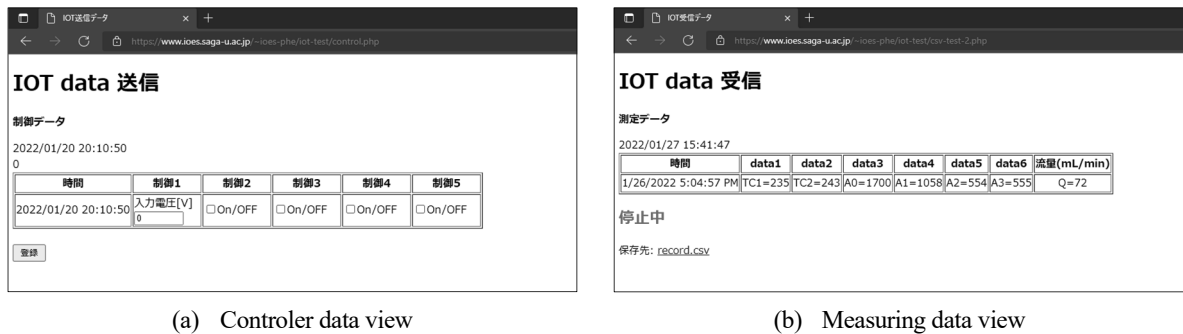


Fig. 5 Monitoring view on Raspberry Pi.



(a) Controller data view

(b) Measuring data view

Fig. 6 IoT controller view on web browser.

図 6 (a), (b) に Web ブラウザに表示された送受信データを示す. 制御及び測定値のモニターはこの Web ブラウザで行う. 一方, 制御データは逆の経路を辿り, 被制御機器を制御する.

3・3 実験方法

実験では、図1に示したIoT機器および水循環装置を用いて、①水中ポンプをモーターコントローラーの出力電圧を制御することで水の吐出量を変化させる、②その時の水の体積流量を測定することで制御信号の出力から流量の変化の応答を確認、また、③水温及び室温を温度センサーで測定することにより、IoT機器の動作及び性能について確認を行った。さらにIoT機器の応答性については、制御用のブラウザでモーターコントローラー制御用の入力電圧を送信した時間から、モーターコントローラーへの入力電圧が実際に変化するまでの時間差を測定することで確認を行った。

4. 結 果

4・1 ポンプ流量の制御

IoT機器による水循環装置のポンプ制御の妥当性の検証のため、任意のモーターコントローラーからのポンプへの入力電圧 E_{MC} [V] で得られた体積流量 Q [L/min] との関係を求めた。ここで、ポンプの制御信号の流れを説明する。まず初めに、IoT機器からは制御用のWebブラウザをモーターコントローラー制御用信号として入力電圧を $E_{in} = 0 \sim 5V$ の範囲で与えた。モーターコントローラーは制御用の信号を受けて、 $E_{MC} = 0 \sim 12V$ で電圧を比例出力する機能を持つ。水中ポンプの電源入力側はモーターコントローラーの出力側と直結しており、この電圧を受けることで、 $0 \sim 12L/min$ の範囲で吐出流量を可変する。ここで、モーターコントローラーの出力電圧をポンプ入力電圧は等しくなることから、いずれもその電圧を E_{MC} と表すこととする。なお、 E_{MC} の値はIoT機器のI2Cセンサーの一つであるA/D変換器では測定ができないため、別途用意した電圧計で測定を行い、その値を直接記録した。一方、体積流量計の測定値は、 $4 \sim 20mA$ の電流信号で出力されることから、出力信号の回路に 250Ω のシャント抵抗を挿入して $1 \sim 5V$ の電圧に変換を行い、その電圧 E_{AD} をA/D変換器に入力して測定を行った。ここで電圧 E_{AD} から体積流量 Q への変換式を式(1)に示す。

$$Q = (E_{AD} - 1) \times \left(\frac{30}{4}\right) \quad (1)$$

測定結果を図7に示す。図7よりIoT機器からの入力電圧 E_{in} の増加およびそれに比例するモーター入力電圧 E_{MC} の増加に対して、体積流量 Q も増加することが分かる。このことから、IoT機器からのポンプの制御が正常に行われていることが確認できる。

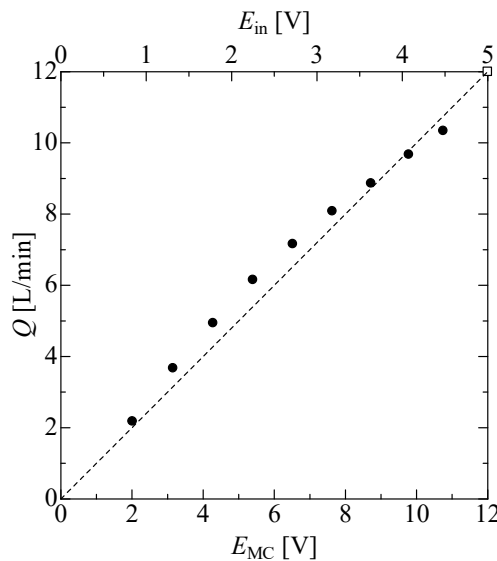


Fig. 7 Input voltage of pump E_{MC} and E_{in} vs. volumetric flow rate Q .

また, 図7より入力電圧 E_{MC} と体積流量 Q は定格値からわずかに外れていることが分かる. 8V 以下の低電圧では定格より高めの体積流量が得られているが, 8V 以上では定格より低い流量に転じている. これは, 水中ポンプに接続された配管の流動抵抗によるものであると考える.

4・2 IoT 機器の応答性

本実験においてはポンプの制御を Web ブラウザから行っているが, その制御信号が瞬時に伝わりポンプを制御しているわけではない. 本実験装置では, まず Web ブラウザに電圧値を入力後 IoT 機器にデータが渡され, それに応答することで制御信号をモーターコントローラーに発している. 複数の機器を介して信号が伝わっていることから, 最低でも数秒の応答時間が必要となる. そこで, 本実験装置における応答時間を IoT 機器による水循環装置のポンプ制御の応答時間について測定を行った. 応答時間は, Web ブラウザに電圧値を入力した時間からポンプの入力電圧 E_{MC} が変化した時間までを計 10 回計測した. その結果を図 8 に示す. 平均値は 15.1 秒であった. 図 8 より測定回数により応答時間のばらつきがあり, 最小値は 12.6 秒, 最大値は 16.3 秒であった. 本実験装置のようなポンプ出力制御のみの簡単な制御であれば, 他の装置への影響もないために支障のない時間といえるが, 大規模なプラントの場合は制御の遅延がプラントに致命的な影響を与える場合も考えられるために, 1 秒以内の応答が望ましい. 応答時間の短縮は, ソフトウェア, ハードウェアの両面でのチューニングが必要と考えられる. これらの改良による応答時間短縮を今後の目標としたい.

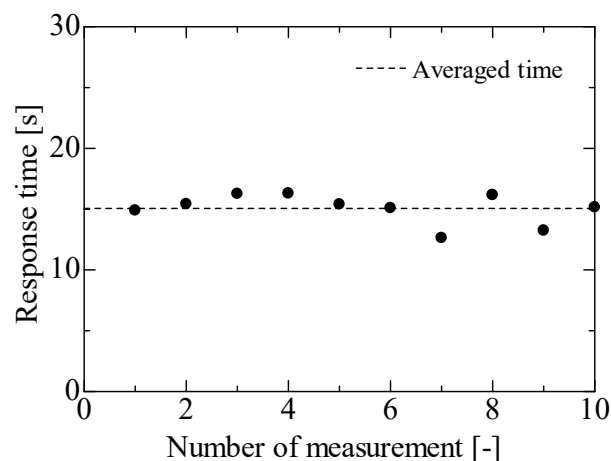


Fig. 8 Response velocity of input signal from IoT device.

5. 結 言

本研究では, IoT 機器を使った OTEC プラントの遠隔制御・測定の可能性を探るために, 簡易的なプラント装置として, 水循環装置を用いた制御・測定の実験を行った. その結果, 今回考案したシステムにおいて, ポンプの制御が問題なくできることが確認された. 一方, 遠隔制御では応答まで 15 秒程度かかることが明らかとなり, 応答時間が長く十分な成果が得られなかった. 今後は, ソフトウェア, ハードウェアの改良により応答時間を 1 秒前後まで短縮することを目標としたい.

謝 辞

本研究は, 2015 年度の海洋エネルギー研究センター共同利用研究である「小型制御用デバイスを用いた海洋温度差発電プラントの制御・測定に関する研究」(元秋田大学・廣瀬圭先生, 採択番号: 15015A) を元に発展させたものである. 廣瀬先生には研究の機器の構成及びソフトウェアの選定において多くのご助言, ご協力をいただいた. ここに記して感謝します.

文 献

- 長谷川隆章, 井上俊司, 宇都正太郎, 石田茂資, 藤原智, 洋上浮体からの電力送電システムに関する技術開発計画, 日本船舶海洋工学会講演会論文集第 11E 号, (2010).
- 江頭成人, 後藤聡, 杉剛直, 森崎敬史, 永溝喜也, 池上康之, 海洋温度差発電プラントのインターネットを用いた遠隔制御システムに関する研究, 平成 24 年度 佐賀大学海洋エネルギー研究センター 共同利用・共同研究成果発表会, 2012 年 9 月 25 日, 佐賀大学海洋エネルギー研究センター, (2012).
- 江頭成人, 後藤聡, 杉剛直, 松田吉隆, 森崎敬史, 原口利樹, 池上康之, 海洋温度差発電プラントの水槽水位遠隔制御実験環境を応用した遠隔操作システムに関する研究, 平成 27 年度 佐賀大学海洋エネルギー研究センター 共同利用・共同研究成果発表会, 2015 年 9 月 16 日, 佐賀大学海洋エネルギー研究センター, (2015).
- 後藤聡, 末次輝章, 松田吉隆, 杉剛直, 森崎敬史, 池上康之, 江頭成人, ランキンサイクルを用いた海洋温度差発電プラントの遠隔監視 Web アプリケーション開発, システム制御情報学会論文誌, Vol. 29, No. 9, (2016), pp. 414-421.
- 電力中央研究所, 再エネ海域利用法を考慮した洋上風力発電の利用対象海域に関する考察, 電力中央研究所研究資料, No. Y19502, (2019), p. 20.