

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K00653

研究課題名(和文) 冷媒と潤滑油の混合物による流体機械の性能に基づく小型有機ランキンサイクルの開発

研究課題名(英文) Development of Small Output Organic Rankine Cycle Based on Performance of Fluid Machine with Mixture of Refrigerant and Lubricant

研究代表者

佐々木 壮一 (SASAKI, Soichi)

長崎大学・工学研究科・助教

研究者番号：00304965

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：潤滑油を混合した有機冷媒R245faのVLEデータを測定し、そのVLEデータをもとに熱物性を推算する予測式について検討した。さらに、小出力ORCの実現可能性の向上を目的としてORCのテストプラントを実際に開発し、冷媒と潤滑油の混合物がタービン性能に及ぼす影響について考察した。容積型タービン出口側の圧力は体積比の影響で凝縮器の冷却温度で決定される圧力まで低下しない。テストプラントに適切な負荷が与えられると、その最大出力は約107Wになる。潤滑油の混合割合が50%を越えると、その作動流体の蒸気圧が低下するために、タービン性能が劣化する可能性があることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

環境省は、2013年に、長崎県雲仙市の小浜温泉において未利用温泉熱を利用した温泉バイナリー発電の実証試験を実施した。小浜温泉バイナリー発電所の売電事業開始当初の定格出力は216kWであり、法令上、その運用には電気主任技術者による管理が必要となる。一方、一世帯が一月に必要な平均的な消費電力量(300kWh)を供給することができる小出力の発電システムは、太陽光発電システムのように一般電気工作物として取り扱われる。このため、小出力のバイナリー発電システムは各世帯での電力の直接の利用を可能にする。研究代表者は持続可能な地熱エネルギーを独立電源として地域で直接の利用することを提案している。

研究成果の概要(英文)：The VLE data of organic refrigerant R245fa mixed with lubricating oil was measured, then the prediction equation for estimated thermophysical properties based on the VLE data was considered. Furthermore, the test plant of the organic Rankine cycle (ORC) was developed for the improving the feasibility of small-output ORC. We discussed the effect of the mixture of the refrigerant and lubricating oil on the turbine performance. The pressure on the outlet side of the displacement type turbine could not decrease to the pressure determined by the cooling temperature of the condenser due to the influence of the volume ratio. When the test plant is properly loaded, its maximum output of the present test plant becomes about 107W. We clarified that when the mixing ratio of the lubricating oil exceeds 50%, the steam pressure of the working fluid itself decreases, which may cause the deterioration of the turbine performance.

研究分野：流体工学

キーワード：ランキンサイクル スクロールタービン 有機冷媒 潤滑油 VLE

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

日本国内の地熱エネルギーの埋蔵量は世界第3位であり、環境省の調査では推定地熱資源量が2,357万kW(原発20基分)と報告されている<sup>(1)</sup>。この地熱エネルギーを変換する100kW級の小規模バイナリー発電システムが、2012年7月に開始されたFIT制度とともに市場へ投入されている。2013年には、環境省は長崎県雲仙市の小浜温泉において未利用温泉熱を利用した温泉バイナリー発電の実証試験を実施した<sup>(2)</sup>。小浜温泉バイナリー発電所の売電事業開始当初の定格出力は216kWであり、法令上、その運用には電気主任技術者による管理が必要となる。一方、一世帯が一月に必要とする平均的な消費電力量を供給することができる小出力(20kW未満)の発電システムは、太陽光発電システムのように一般電気工作物として取り扱われる。このため、電気保安協会のような外部委託による運用が可能となり、小出力のバイナリー発電システムは各世帯での電力の直接の利用を可能にする。研究代表者はこの再生可能エネルギーの独立電源としての直接の利用を提案している<sup>(3)</sup>。しかし、スケールメリットの小さな小出力バイナリー発電システムはその開発と商業化の困難さから現在でも実用化には至っていない。研究代表者は、このような小出力バイナリー発電の開発を目的として、環境負荷の低い自然冷媒(CO<sub>2</sub>)によるランキンサイクルの実現可能性について検討した<sup>(4)</sup>。しかし、自然冷媒を作動流体とした動力サイクルはシステム全体が高圧になるため、ポンプ動力とタービン出力のエネルギー収支の問題からその実現可能性は低いことが明らかになった。一方、いくつかの有機冷媒の熱物性値による計算によって、R245faの熱効率は相対的に高く、理論的には正の出力が得られることを示した<sup>(5)</sup>。また、容積型圧縮機を転用したタービンの流体力学的性能の実機試験から、排気量60ccのスクロールタービンを小出力の有機ランキンサイクル(以下、ORC)のタービンに転用できること<sup>(6)</sup>、容積型タービン固有の圧力比は小出力ORCの熱力学的特性を設計する上で重要な因子になること<sup>(7)</sup>、その圧力比によるタービンの不足膨張が発電量の劣化を引き起こすこと<sup>(8)</sup>などを明らかにした。

### 2. 研究の目的

冷蔵庫やエアコンのような有機冷媒を利用した冷凍サイクルでは、そのシステムの摩擦抵抗が作動流体に潤滑油を加えることで低減される。しかし、有機冷媒と潤滑油の混合比が小出力の有機ランキンサイクルの性能に及ぼす影響については依然として不明な点も多い。本研究では、潤滑油を混合した有機冷媒R245faのVLEデータを測定し、そのVLEデータをもとに熱物性を推算する予測式について検討した。さらに、小出力ORCの実現可能性の向上を目的としてORCのテストプラントを実際に開発し、冷媒と潤滑油の混合物がタービン性能に及ぼす影響について考察した。

### 3. 研究の方法

#### (1) 作動流体と潤滑油の組成

ORCの作動流体となる冷媒には、R245faが採用されている。R245faの分子量は134.03g/mol、沸点は15.3°C、融点は-103°Cである。表1は潤滑油の組成を示したものである。潤滑油には、冷凍サイクルで実際に使用されているパラフィン系オイル(SUNICE)P56およびSL68Sが選定された。P56はポリアルキレングリコールを主成分とするカーエアコン用の潤滑油として広く使用されている。SL68Sはポリオールエステルを主成分とし、冷凍機用の潤滑油として使用されている。

Table 1 Properties of SUNICE P56 and SL68S

	unit	P56	SL68S
Density (15°C)	g/cm <sup>3</sup>	1.0154	0.9593
Flash point	°C	238	260
Pour point	°C	-40	-37.5
Average molecular weight	g / mol	1036.3	658.3
Moisture	ppm	231.3	32.6
Main component	-	PAG	POE

#### (2) VLEデータの測定方法

図1には、二成分混合物のVLEデータを測定するための実験装置が示されている。(a)は平衡セルと配管の外観である。気液平衡状態にある系の状態を決める変数は、温度、圧力(蒸気圧)、液相の組成、気相の組成である。これらの変数のうち、2個の変数の値が分かれば系の熱力学的な状態が記述できる。二成分系の蒸気圧測定では、温度の他に気相もしくは液相のどちらかの層の組成を決めなければならない。本実験の二成分系の蒸気圧測定法では、静止法が採用されている。静止法は、恒温槽内に設置された平衡セル内に混合液を注入し、安定した温度において気液平衡状態の蒸気圧を測定する方法である。試料は十分に真空引きされた平衡セルに注入され、その組成が重量法によって決定される。(b)はVLEデータ測定のための実験装置の全体図を示したものである。実験装置は、測定対象となる試料が注入される平衡セル、試料の温度を一定に保つための恒温槽(F)、攪拌装置(H)、白金抵抗温度計(G)、圧力センサ(E)、デジタルマルチメータ(B)から構成されている。質量分率の決定には、電子天秤が使用されている。

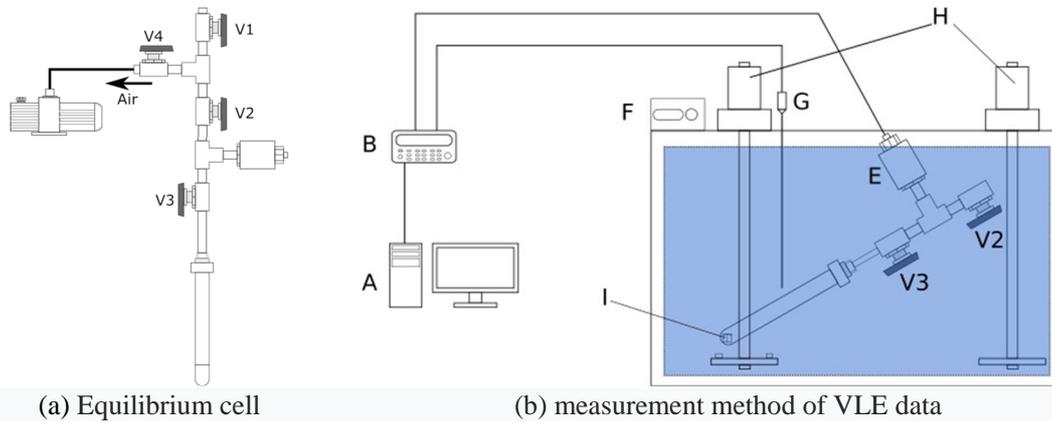


Fig. 1 Experimental apparatus for the measurement of VLE data

### (3) 有機ランキンサイクルのテストプラント

図 2 は ORC のテストプラントを示したものである。95.0°C の温水が流量 2.0L/min で蒸発器に流入すると、その温水は熱交換後に 66.9°C で排出される。そのため、この蒸発器で冷却された温水は断熱容器内のヒーターによって再加熱される。ORC を構成する機器前後の計 10 点の温度が熱電対とデータロガー (GRAPHTECH, GL240) によって計測される。蒸発器を通過した点 3 の作動流体の相変化の状態を、サイトグラスにより確認することができる。2017 年に製作されたテストベンチ (1 号機) では、タービンの代わりに蒸気用減圧弁 (YOSHITAKE, GD-30) が用いられた。作動流体の輸送にはギアポンプ (IWAKI, MDG-M4T6B100) が用いられている。ポンプの入口側 (点 1) にもサイトグラスが取り付けられ、ポンプに流入する作動流体の状態を確認することができる。圧力の測定位置は、ポンプ出口 (点 2)、蒸発器出口 (点 3)、減圧弁出口 (点 4) の 3 か所である。ファンの消費電力は電力計 (HIOKI, PW3360-91) によって計測される。ORC の各点における作動流体の物性値に基づいて評価されたサイクルの理論熱効率は約 7.1% になる。

図 3 はスクロールタービンのテストベンチを示したものである。(a) がスクロールタービン、(b) がテストベンチの全体図である。この研究では、カーエアコン用のスクロールコンプレッサーがタービンに転用されている。このコンプレッサーが一回転すると、60cc の気体が排出される。タービンの軸動力はトルク計 (小野測器, SS-020) とトルク検出器 (小野測器, TS-2800) によって計測される。駆動軸の回転速度は電磁式回転検出器 (小野測器, MP981) で計測される。軸出力に対する反動トルクは三相誘導電動機によって与えられる。2019 年に製作されたテストプラント (2 号機) には、このタービンのテストベンチがそのまま搭載されている。

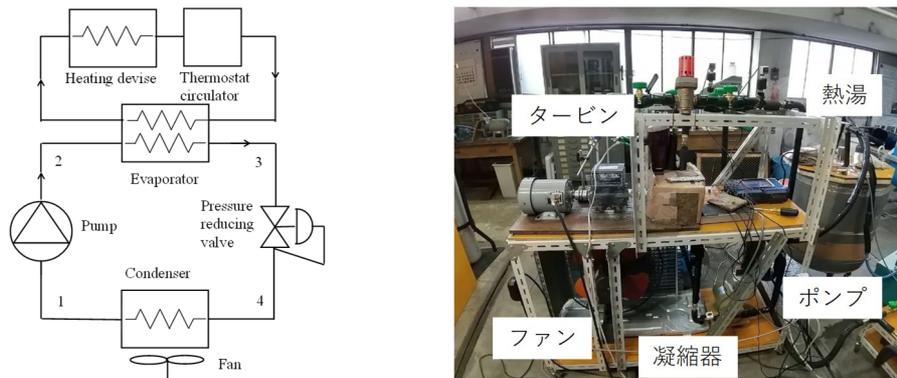


Fig. 2 Test plant of the organic Rankine cycle



(a) scroll turbine

(b) testbench for the turbine

Fig. 3 Measurement method of the turbine performance

#### 4. 研究成果

図4はR245faとP56の混合物のVLEデータをもとにして検討した熱物性の予測である。高精度な推算式を作成するため、Redlich-Kister<sup>(9)</sup>の展開によるMargules式<sup>(10)</sup>を用いて、その活量係数モデルによりフィッティングした。図中のプロットは実測値で、破線は気相の組成を表したものである。混合液中に占める潤滑油の割合が大きくなるほど、同じ温度でも蒸気圧が低くなる。また、潤滑油の組成比が約50%を超えると、蒸気圧が急激に低下する。このような急激な蒸気圧の低下が質量分率50%付近で起こった原因としては、R245faの密度(20°Cの際の飽和液密度)が1.32g/cm<sup>3</sup>であるのに対して、潤滑油P56の密度が1.0154g/cm<sup>3</sup>と近いためであると考えられる。以上の結果から、P56よりも比重の大きい潤滑油やR245faよりも比重の小さい冷媒が使用されると、ごく少量の潤滑油が混入しただけで急激に蒸気圧が低下する可能性がある。

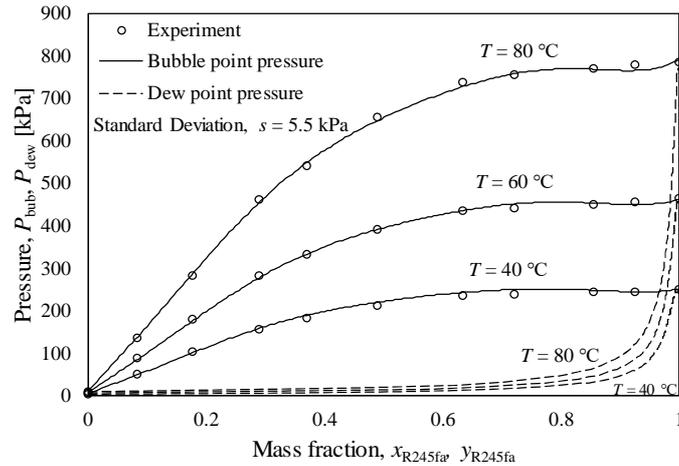


Fig.4 Thermophysical properties of R245fa / P56 mixture based on the VLE data

図5には、スクロールタービン単体の特性が示されている。これは、図3(b)のテストベンチで測定された性能である。図中の凡例は、タービン入口側の平均圧力である。(a)がタービン差圧であり、(b)が圧力比である。ORCにおけるタービンの設計流量は59.4L/minである。熱物性値によって決定される理論的なタービン差圧は268.3kPaである。このとき、設計点での実測値の圧力比は2.22となる。また、設計点での軸出力は38.9Wであり、そのタービン効率も14.9%になる。表1はORCの性能を整理したものである。タービン効率とポンプ効率を加味したORCのサイクル効率は式(1)によって評価される。

$$\eta = \frac{(h_3 - h_4) \eta_t}{h_3 - h_2} - \frac{h_2 - h_1}{(h_3 - h_2) \eta_p} \quad (1)$$

ここで、 $h$ は各測定点における比エンタルピー(kJ/kg)、 $\eta_t$ はタービン効率、 $\eta_p$ はポンプ効率である。ポンプ効率は0.6と仮定されている。ORCの熱効率は0.923%になった。このとき、ORCの正味出力は36.1Wになった。

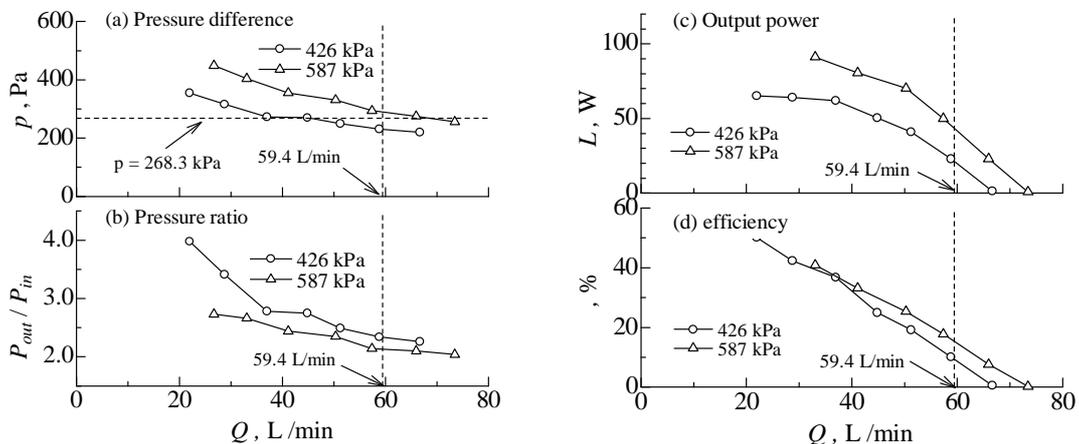


Fig. 5 Characteristics of the scroll turbine

Table 2 Summary on the performance of organic Rankine cycle

Mass flow rate	0.0171 (kg/s)
Volume flow rate	59.4 (m <sup>3</sup> /min)
Turbine efficiency	0.149 (measurement)
Pump efficiency	0.6 (assumption)
Theoretical output power	277 (W)
Net output power	36.1 (W)
Thermal efficiency	0.923

図6はテストプラントの  $T-s$  線図を示したものである。図中の点が実測値である。また、図中には、実測値の範囲の最小圧力に基づいて作成された等圧線(茶色)も合わせて示されている。図中の等圧線で囲まれた範囲が ORC の理論的な出力となる。実測値の出力は理論値の出力よりも小さい。タービン出口側の圧力はスクロールの物理的な膨張率によって決定される。これは、例えば、低温熱源の温度が凝縮器によって低く設定されたとしても、タービン出口側の圧力は凝縮器の冷却温度で決定される圧力まで低下することが出来ないことを示すものである。

図7には、スクロールタービンの出力特性が示されている。タービンの流量と出力は、それぞれの最大値で無次元化されている。□は窒素ガスで試験されたタービン単体の性能であり(図3(b))、●はテストプラント2号機に搭載されたタービンの性能である。両者の特性は概ね一致することがわかる。表2では、作動点の流量が 0.0171kg/s に設定された。性能試験の結果から、この作動点は過流量の運転条件であることがわかる。図5の実験結果に基づけば、テストプラントに適切な負荷が与えられると、その最大出力は約 107W になると予測される。R245fa と潤滑油の混合物質に含まれる潤滑油の混合割合が高くなると、タービンの摩擦損失は改善されると考えられる。しかし、潤滑油の混合割合が 50%を越えると、その作動流体自身の蒸気圧が低下するため、タービン性能が劣化する可能性があることがわかった。

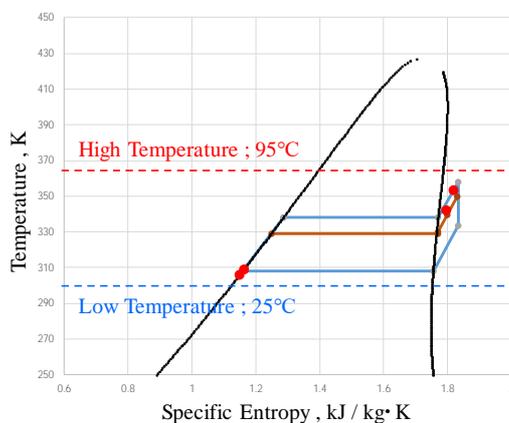


Fig. 6 T-s diagram of the ORC

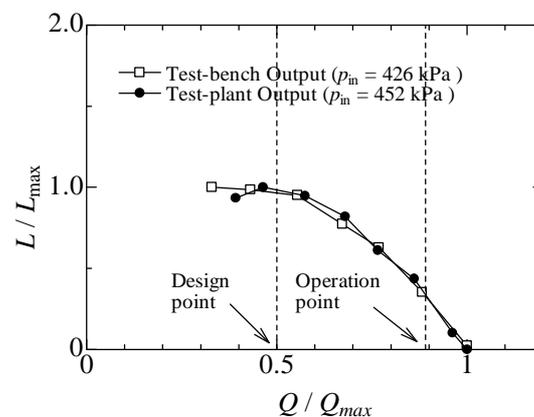


Fig. 7 Measured characteristic of the scroll turbine

#### 参考文献

- (1) 環境省, 平成 22 年度 再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書, 2011.4, p.216.
- (2) 環境省, 平成 25 年度 低炭素地域づくり集中支援モデル事業報告書, チャレンジ 25 地域づくり事業, 2013
- (3) 佐々木, 出力 400W の超臨界 CO<sub>2</sub> ランキンサイクルの開発と展望, 小浜温泉バイナリー発電スケール対策実証事業(雲仙市), 招待講演, 2014
- (4) 佐々木, 超臨界 CO<sub>2</sub> ランキンサイクルを可能にするマイクロスクロールタービンの開発, 科研費 挑戦的萌芽研究, 研究番号 25550094, 2013-2016
- (5) 早崎, 他 2 名, 日本機械学会九州支部講演論文集, 2016, pp.293-294.
- (6) 佐々木, 他 4 名, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, 3 pages, 2016
- (7) 早崎, 他 4 名, 日本機械学会年次大会講演論文集, 2016, 5 pages
- (8) 佐々木, 他 4 名, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, 3 pages, 2017.
- (9) Otto Redlich, A. T. Kister, Ind. Eng. Chem., 40(2), pp. 345-348, 1948
- (10) Margules, M., Sitzgsber Acad. Wiss. Wien, 104, p. 1243, 1895

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Yamaguchi Tomohiko, Sasaki Soichi, Momoki Satoru	4. 巻 160
2. 論文標題 Experimental study for the small capacity organic Rankine cycle to recover the geothermal energy in Obama hot spring resort area	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Energy Procedia	6. 最初と最後の頁 389-395
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.172">https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.172</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 S. Sasaki, T. Yamaguchi, H. Moritaka, R. Harada	4. 巻 -
2. 論文標題 FEASIBILITY STUDY ON SMALL OUTPUT ORGANIC RANKINE CYCLE USING HFC245FA IN LOW GRADE HEAT SOURCE	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the 29th International Symposium on Transport Phenomena	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 佐々木壮一, 山口朝彦, 森高秀四郎, 原田瑠偉	4. 巻 48(92)
2. 論文標題 R245faを作動流体とした小出力有機ランキンサイクルのテストプラントの開発	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 長崎大学大学院工学研究科研究報告	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Soichi Sasaki, Syodai Hayasaki, Tomohiko Yamaguchi, Hideshiro Moritaka 4	4. 巻 -
2. 論文標題 Feasibility Study of a Compact Organic Rankine Cycle Based on Performance of a Fluid Machinery	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of the 13th International Symposium on Experimental International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 佐々木壮一, 山口朝彦, 森高秀四郎, 早崎翔大	4. 巻 46
2. 論文標題 小温度差熱源で作動する小出力ランキンサイクルの実現可能性	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 長崎大学大学院工学研究科研究報告	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Soichi Sasaki	4. 巻 -
2. 論文標題 Prediction Methodology of Broadband Noise Generated from a Cooling Fan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PROCEEDINGS of the 23rd International Congress on Acoustics	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="http://pub.dega-akustik.de/ICA2019/data/articles/000908.pdf">http://pub.dega-akustik.de/ICA2019/data/articles/000908.pdf</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 佐々木壮一	4. 巻 48
2. 論文標題 冷却ファンから発生する広帯域騒音の実験的予測法	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ターボ機械	6. 最初と最後の頁 216-223
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 佐々木壮一	4. 巻 -
2. 論文標題 冷却ファンから発生する広帯域騒音の予測に関する実験的研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本機械学会第97期流体工学部門講演会 講演論文集	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 佐々木 壮一, 山口 朝彦, 森高 秀四郎, 原田 瑠偉
2. 発表標題 小温度差熱源で作動する有機ランキンサイクルの出力性能の評価
3. 学会等名 日本機械学会北九州講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Soichi Sasaki
2. 発表標題 Study on Performance of a Scroll Turbine for Compact Organic Rankine Cycle by Low Temperature Difference
3. 学会等名 The 6th Korea-Japan Joint Workshop on Fans and Compressors (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 原田瑠偉, 佐々木壮一, 山口朝彦, 森高秀四郎
2. 発表標題 低温度差熱源による小出力オーガニックランキンサイクルの開発(テストプラントの製作)
3. 学会等名 日本機械学会九州学生会第49回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐々木壮一, 早崎翔大, 渡邊耕介, 山口朝彦, 森高秀四郎
2. 発表標題 小出力ランキンサイクルにおけるスクロールタービンの性能に関する実現可能性の検討
3. 学会等名 日本機械学会第94期流体工学部門講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 佐々木壮一 , 山口朝彦 , 馬越孝道 , 森高秀四郎
2. 発表標題 小温度差熱源で作動する小出力有機ランキンサイクルの実現可能性
3. 学会等名 地熱シンポジウム in 雲仙
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 早崎翔大 , 佐々木壮一 , 山口朝彦 , 森高秀四郎
2. 発表標題 小出力有機ランキンサイクルの特性に及ぼす流体機械性能の影響
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第70期講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐々木壮一
2. 発表標題 冷却ファンから発生する広帯域騒音の実験的予測法
3. 学会等名 ターボ機械協会岡山講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Soichi Sasaki
2. 発表標題 Experimental Study of Broadband Noise Generated from a Cooling Fan
3. 学会等名 The 7th Korea-Japan Joint Workshop on Fans and Compressors (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Sasaki, Tomohiko Yamaguchi, Hideshiro Moritaka
2. 発表標題 Development of Test Plant for Small Output Organic Rankine Cycle in Low Grade Heat Source
3. 学会等名 International Workshop on Environmental Engineering 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	山口 朝彦  (YAMAGUCHI Tomohiko)  (00284711)	長崎大学・工学研究科・准教授   (17301)	
研究分担者	馬越 孝道  (UMAKOSHI Kodo)  (30232888)	長崎大学・水産・環境科学総合研究科(環境)・教授   (17301)	