

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：12101

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14677

研究課題名(和文) 生体流体機能を積極的に活用した超小型磁気浮上式小児用人工心臓の実現

研究課題名(英文) An ultra-compact magnetically levitated pediatric ventricular assist device with low level heat generation utilizing bio-fluid transportation

研究代表者

長 真啓 (Osa, Masahiro)

茨城大学・理工学研究科(工学野)・講師

研究者番号：30735105

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：体内植込み型小児用補助人工心臓用に超小型化した、アキシアルギャップセルフベアリングモータについて、種々の動作点での非接触ポンプ駆動、モータ発熱による溶血、血栓形成を惹き起こさないことを目指し、モータコア材料の検討による損失低減、流体粘性減衰を活用した浮上インペラ制振、生体流体送液時の熱放散による機器発熱抑制の検証を行った。コア材料を圧粉磁心、積層鋼板とすることで1-3 Wの低消費電力で安定したインペラ非接触支持、ポンプ駆動を実現した。チタン製ポンプを用いた動物試験において、駆動時の過度な機器発熱はなく、ポンプ部の血栓形成を認めなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現状で臨床使用可能な小児用補助人工心臓は、世界でも体外設置型拍動流式のEXCOR Pediatricに限られる。本装置には、ポンプ内血栓や送脱血管刺入部の感染症のリスクが課題である。一方で、体内植込み型の連続流式人工心臓の実現には、耐久性および血液適合性の高い非接触インペラ支持機構の小型化が求められ、その実現が困難である。本研究における小型な磁気浮上モータによる浮上インペラの安定支持、発熱抑制が実現できれば、磁気浮上モータの小型化・高性能化に関する知見が得られるだけでなく、体格の小さな小児患者の長期循環補助治療の確立に貢献できる。

研究成果の概要(英文)：An ultra-compact axial-gap self-bearing motor has been developed for an implantable pediatric ventricular assist device. The motor core material was changed to a magnetic powder core to reduce the eddy current loss of the self-bearing motor. The first prototype pump, which consists of the low loss motor and a centrifugal blood pump, indicated stable impeller suspension without contact at various operating conditions, and sufficient pump characteristics for pediatric circulatory support. A titanium blood pump was fabricated to achieve well blood compatibility. Stable circulatory support was achieved without excessive heat generation of the motor or thrombus formation in the blood pump during chronic animal test with extracorporeal circulation.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：セルフベアリングモータ アキシアルギャップ 高効率化 発熱抑制 小児用人工心臓 血液ポンプ 非接触支持

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

小児の心不全治療に適用可能な循環補助装置は、世界でも体外設置型拍動流式補助人工心臓の EXCOR pediatric に限られる。現有の体外設置型補助人工心臓には患者の Quality of Life、および血栓塞栓症や感染症の発生等の合併症において課題があり、連続流型の体内植込み式補助人工心臓開発が臨床現場から切望される。しかし、小型、高耐久、優れた血液適合性を有する小児用補助人工心臓の実現は容易ではない。米国では、軸流ポンプ式補助人工心臓 Jarvik2015 が研究開発されているが、本デバイスの接触式軸受を用いたインペラ支持方式には、接触式軸受に起因する溶血や血栓の課題が完全に解決されていない。体格の小さな小児に供せる補助人工心臓実現のためには、完全非接触なインペラ支持機構を有する補助人工心臓の小型化が不可欠である。本研究では、二つのモータステータのみでインペラ姿勢の 5 軸すべてを能動制御可能な新規な非接触支持方式を考案(図 1)、磁気浮上モータを外径 22 mm、高さ 34 mm まで超小型化、小児用人工心臓試験機を開発して溶血試験、体外設置での急性動物実験を実施した。設計条件での溶血量が臨床的に許容範囲内であること、インペラ非接触支持を維持しながら 24 時間の連続運転が可能であることを実証した。一方、磁気浮上モータの超小型化に伴いエネルギー効率が激減するため、駆動条件によっては機器の温度上昇が溶血、血栓形成を惹起する新たな課題に直面した。

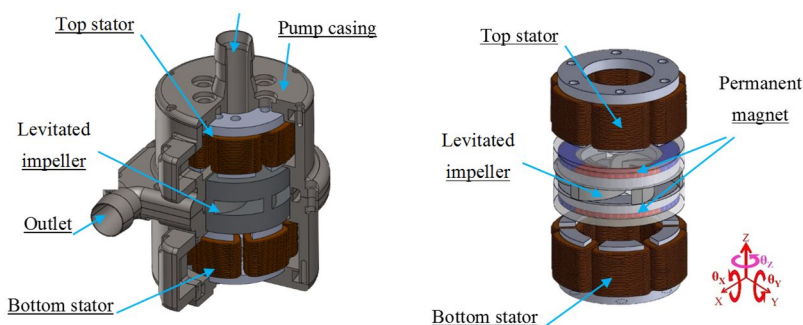


図 1 ダブルステータ型磁気浮上モータを用いた小児用補助人工心臓の概要

2. 研究の目的

小児用人工心臓開発の成否は、高耐久、血液適合性の良い軸受機構をいかに小型化できるかで決まり、小型なインペラ非接触支持機構の開発が唯一の活路といっても過言ではない。本研究では、超小型な磁気浮上系を維持しつつ、モータの損失低減、生体流体への積極的な熱放散を活用することによる発熱抑制効果を検証し、体内植込み型の磁気浮上型小児用補助人工心臓の実現可能性を追求する。モータコア材料変更による損失低減、血液の粘性減衰の積極的活用による磁気支持電力最小化、チタンポンプの熱伝導特性による生体流体(血流)による積極的機器冷却、動物実験を用いた医学的評価、植込み型補助人工心臓実現に向けた磁気浮上システムの高度化を進める。

3. 研究の方法

(1) モータ磁性材料に圧粉磁心を用いた損失低減による高効率化モータの第一試作

既開発磁気浮上モータでは、加工の簡易さ、テストベンチでの機器取り扱いの容易さからモータコアに純鉄無垢材を使用していた。発熱抑制のために磁性材料を純鉄無垢材から圧粉磁心材料へ変更することを検討し、入力電力(鉄損)削減を図った。

(2) 圧粉磁心モータを用いた磁気浮上血液ポンプ試験機の試作と特性評価

磁性材料変更に伴い磁気特性が劣化する可能性がある。このため、十分な磁気支持性能が得られるかを確認するために、樹脂製のケーシングからなる磁気浮上人工心臓試作初号機を構築し、定常運転における循環補助性能と磁気支持性能の評価、加振機等を用いた強制加振による耐衝撃性能の評価を行った。

(3) 慢性動物試験を目指したチタン製ポンプの検討

浮上インペラの位置を検出する際にチタンケーシングを介す場合に、センサ検出性能が低下して位置計測が困難となる。あらかじめ最も精度よく位置検出ができる合金材料の選定、材料厚さと位置検出能を調査した。

(4) チタン製ポンプを用いた非接触ポンプ駆動の実現可能性検証

生体適合性向上を考慮したチタン製のポンプケーシング，および圧粉磁心を用いた低損失化モータからなる小児用人工心臓第二試作機を開発し，十分な循環補助性能，インペラ非接触支持性能が得られるかを確認した．

(5) チタン製ポンプ体外設置での慢性動物試験による性能評価

小児用人工心臓第二試作機を体外設置した状態で急性動物実験を実施し，チタンケース化ポンプの抗血栓性，ポンプ駆動時の血流による冷却の効果の検証，ポンプ内血栓の評価を行った．

(6) モータ磁性材料に積層ケイ素鋼板を用いた更なるモータ効率化の検討

磁気浮上モータの改良として，更なる消費電力削減のために磁気浮上モータの磁性材料の検討を進めた．積層ケイ素鋼板を用いたモータステータを開発し，モータ発生支持力・トルクの基礎特性を検証した．

(7) 植込み型人工心臓実現のための駆動系の改良

検討機器の体内植込みを見据えてドライブラインの小径化，駆動装置の簡素化の実現可能性を検証した．従来機では，突極ごとに独立した統合型巻線に単相アンプを用いて励磁するのに対し，軸方向位置・回転制御（図 2(a)）と傾き角度・径方向位置制御（図 2(b)）のための巻線をそれぞれ配置する分割巻線方式を採用した．

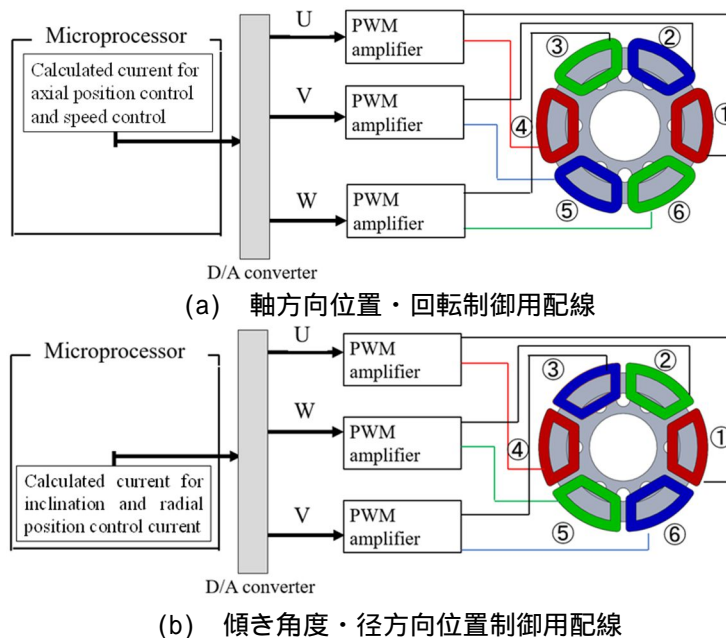
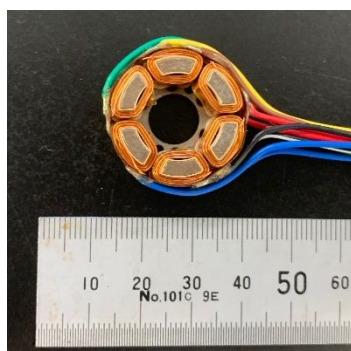


図 2 分割巻線を用いたモータの駆動方式

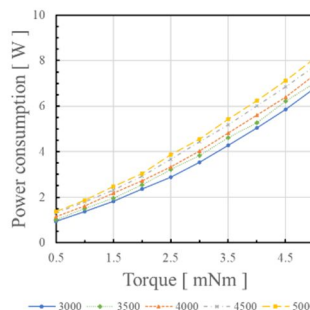
4. 研究成果

(1) モータ磁性材料に圧粉磁心を用いた損失低減による高効率化モータの第一試作

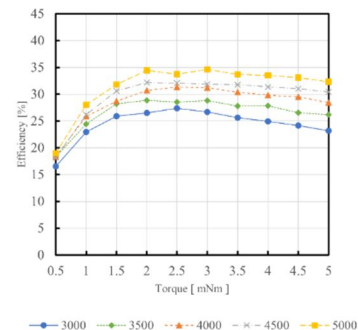
圧粉磁心をモータコア材料に用いた磁気浮上モータを製作した（図 3(a)）．モータ回転時の消費電力は，実使用での負荷トルクを想定する 0.5-1.5 mNm の範囲で約 1-2 W であり（図 3(b)），二つのモータで駆動することを想定しても，2-4 W でポンプを駆動できると想定できる．また，モータ効率率は最大で 34.6% となった（図 3(c)）．



(a)



(b)

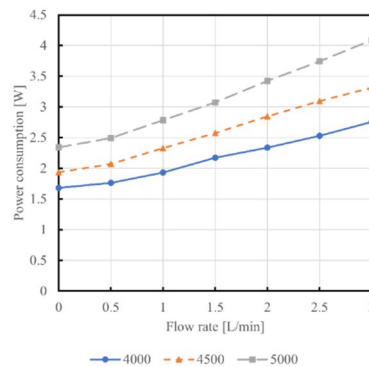
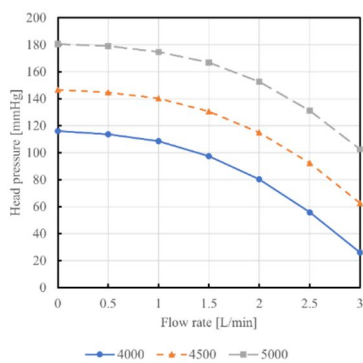
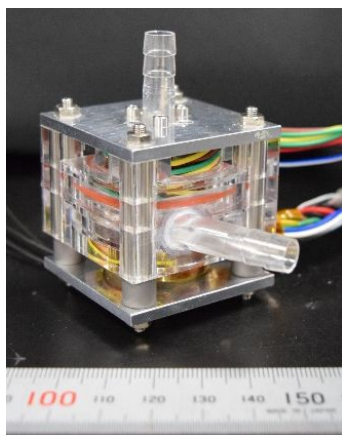


(c)

図 3 製作した圧粉磁心モータと回転時消費電力とモータ効率

(2) 圧粉磁心モータを用いた磁気浮上血液ポンプ試験機の試作と特性評価

圧粉磁心をコア材料に用いた磁気浮上モータ，ダブルポリユート構造を有する樹脂製のポンプケーシング，目玉径を拡大したチタン製の浮上インペラを製作し(図4(a))，小児用補助人工心臓試験機を構築した．本試験機では，非接触で浮上インペラを支持可能であること，回転数4000-5000 rpmにおいて，揚程60-100 mmHgに対して流量を0.5-2.0 L/minまで調節可能であることを実証し(図4(b))，小児用補助人工心臓に必要な循環補助性能を得た．本動作範囲における磁気浮上，回転に必要な入力電力は1.5-3 Wであり(図4(c))，十分に低消費電力での駆動を実現できた．また，代表動作点である回転数4000 rpm，流量1.5 L/min駆出時において加振実験を実施し，5 Gの外乱加速度に十分対抗できることを確認した．



(a) (b) (c)
図4 製作した小児用人工心臓試作初号機とポンプ特性および入力電力

(3) 慢性動物試験を目指したチタン製ポンプの検討

チタンケーシングによるインペラ浮上位置検出用センサの出力劣化について調査した．樹脂製のケーシングを使用した際の約50%まで出力感度が低下した．そこで，チタン材料の組み合わせ検討し，浮上インペラにチタン合金を用いることで出力感度を高めることができることを確認した．また，チタン壁厚さの薄肉化，センサ変換機の改良を行うことで，樹脂製ポンプケーシングを用いた血液ポンプと同等の出力感度である約5 V/mmを担保できた．

(4) チタン製ポンプを用いた非接触ポンプ駆動の実現可能性検証

チタン製のポンプケーシング，浮上インペラを用いた小児用補助人工心臓試験機を製作した(図5)．本試験機でチタン隔壁を透過して浮上インペラの位置検出が可能であることを確認した．また，ポンプの非接触駆動を実現し，樹脂製ポンプケーシングを用いたときと同様のポンプ特性を発揮できた．ポンプ駆動時(4000rpm，流量約1.5 L/min)の浮上インペラの軸方向振動振幅は0.02 mm，最大傾き角度は0.43 degと小さく，非接触ポンプ駆動に十分な振動抑制性能を有していた．この時の入力電力は3.3 Wであり，機器の表面温度上昇は3.2 °Cであった．



図5 製作した小児用人工心臓第二試作機

(5) チタン製ポンプ体外設置での慢性動物試験による性能評価

チタン製ポンプ試験機を用いた機器体外設置での慢性動物試験における，インペラ支持性能，循環補助性能，血液適合性を評価した．機器体外設置でのチタン製ポンプにおける慢性動物試験では，ミニプタの循環補助を行いながら非接触インペラ支持を実現した．また，ポンプ起因の血栓形成は認められず，ポンプ発熱による血液適合性への悪影響は見られなかった．

(6) モータ磁性材料に積層ケイ素鋼板を用いた更なるモータ効率化の検討

積層ケイ素鋼板モータ（図 6(a)）では、既開発の圧粉磁心モータと支持力が同等であったものの、発生回転トルクが約 12% 増加することを確認した。回転時の消費電力は圧粉磁心モータよりも約 1 W 低減され（図 6(b)）、モータ効率は 10% 程度向上した（図 6(c)）。また、圧粉磁心モータを用いた際と同様の磁気支持性能を発揮しながら、ポンプ駆動時のすべての動作点で約 0.5 W の消費電力を低減可能であることを確認し、消費電力削減の効果を実証した。

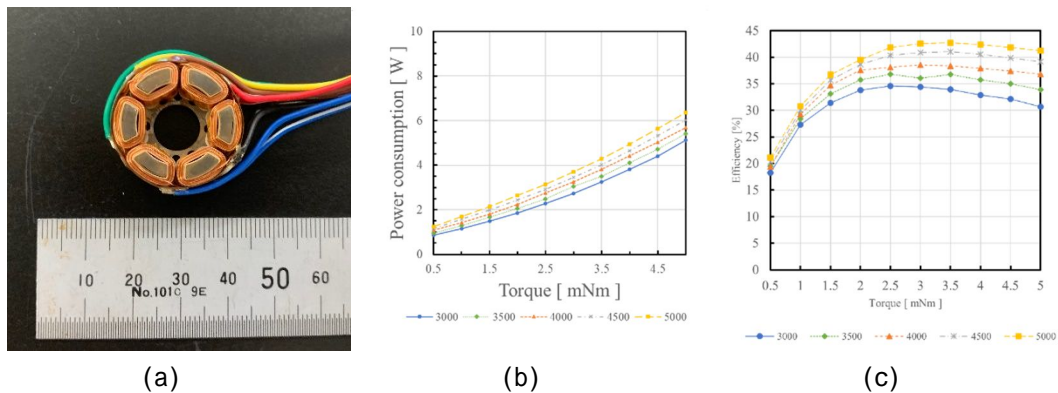


図 6 製作した積層鋼板モータと回転時消費電力とモータ効率

(7) 植込み型人工心臓実現のための駆動系の改良

分割巻線方式のコイルを突極に配置した磁気浮上モータを製作した（図 7）。分割巻線方式でも統合巻線と同等の非接触インペラ支持性能が発揮可能であり、従来機の配線数を半減できることを確認した。一方で、各制御巻線の巻数が減少することから、統合巻線と同等の起磁力を発生させるために必要な電流が増加することで、統合巻線方式よりも入力電力が約 1.4 倍に増加した。今後は、二種類の巻線の巻数比を最適化して低消費電力駆動を目指す。

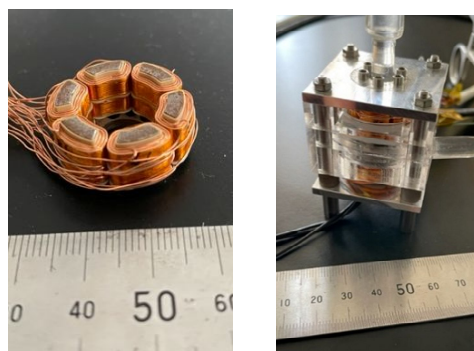


図 7 製作した分割巻線型磁気浮上モータおよびポンプ試験機

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 山下俊大, 増澤徹, 長真啓, 巽英介, 西中知博	4. 巻 30(2)
2. 論文標題 小児用補助人工心臓用磁気浮上モータの異なる制御軸数における磁気支持性能と電力特性の評価	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本AEM学会誌	6. 最初と最後の頁 117-123
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 Masahiro O, Toru M, Kiyoshi Y, Eisuke T	4. 巻 57
2. 論文標題 Double Stator Axial Gap Type Ultra-Compact 5-DOF Controlled Self-bearing Motor for Rotary Pediatric Ventricular Assist Device	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transaction on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 6744-6753
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIA.2021.3105034	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 山口清, 増澤徹, 長真啓, 巽英介	4. 巻 29
2. 論文標題 小児用補助人工心臓用磁気浮上モータにおける省エネルギー化の評価	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本AEM学会誌	6. 最初と最後の頁 168-175
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 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 山下俊大, 増澤徹, 長真啓, 巽英介, 西中知博
2. 発表標題 小児用人工心臓用磁気浮上モータの小型化に関する研究
3. 学会等名 第33回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masahiro Osa, Toru Masuzawa, Toshihiro Yamashita, Eisuke Tatsumi
2. 発表標題 Dynamic Suspension Performance of an Ultra-Compact 5-DOF Controlled Axial Gap Type Self-Bearing Motor for Use in Pediatric Ventricular Assist Device
3. 学会等名 The 17th International Symposium on Magnetic Bearings (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長真啓, 増澤徹, 築谷朋典, 西中知博, 巽英介
2. 発表標題 小児用人工心臓用アキシャル型セルフベアリングモータの動特性評価
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 信太宗也, 増澤徹, 築谷朋典, 長真啓, 西中知博, 巽英介
2. 発表標題 小児用磁気浮上式遠心血液ポンプにおける血液適合性の数値流体解析による評価
3. 学会等名 第59回人工臓器学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長真啓, 山下俊大, 増澤徹, 西中知博, 築谷朋典, 水野敏秀, 片桐伸将, 巽英介, 柳園宣紀, 一ノ瀬高紀
2. 発表標題 超小型な磁気浮上モータを用いた小児用人工心臓の性能評価
3. 学会等名 第59回人工臓器学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長真啓, 山下俊大, 増澤徹, 西中知博, 築谷朋典, 水野敏秀, 片桐伸将, 巽英介, 柳園宣紀, 一ノ瀬高紀
2. 発表標題 小型遠心血液ポンプを用いた磁気浮上型小児用補助人工心臓の研究開発
3. 学会等名 日本定常流ポンプ研究会学術集会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山下俊大, 増澤徹, 長真啓, 巽英介, 西中知博
2. 発表標題 小児用補助人工心臓用磁気浮上モータの異なる制御軸数における磁気支持性能と電力特性の評価
3. 学会等名 第30回MAGDAコンファレンス
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山下俊大, 増澤徹, 長真啓, 巽英介, 西中知博
2. 発表標題 磁気浮上型小児用補助人工心臓の高度化に関する研究
3. 学会等名 第31回フロンティア講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山口清, 増澤徹, 長真啓, 巽英介
2. 発表標題 小児用補助人工心臓用磁気浮上モータにおける省エネルギー化の評価
3. 学会等名 第32回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山下俊大, 増澤徹, 長真啓, 巽英介, 西中知博
2. 発表標題 小児用人工心臓用磁気浮上モータの小型化に関する研究
3. 学会等名 第28回日本機械学会茨城講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 築谷朋典, 長真啓, 西中知博, 水野敏秀, 増澤徹, 巽英介
2. 発表標題 乳幼児用体内植込み型補助人工心臓に適した遠心ポンプ形状の最適化に関する研究
3. 学会等名 第58回人工臓器学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山口清, 増澤徹, 長真啓, 巽英介
2. 発表標題 小児用補助人工心臓用磁気浮上モータにおける省エネルギー化の基礎評価
3. 学会等名 第29回MAGDAコンファレンス
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山口清, 増澤徹, 長真啓, 巽英介
2. 発表標題 小児用補助人工心臓の省エネルギー化に関する研究
3. 学会等名 第30回フロンティア講演会
4. 発表年 2021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
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------