

令和 3 年 6 月 28 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K01056

研究課題名(和文) PBL教育のためのポータブル流体実験室の構築

研究課題名(英文) Development of the Mobile Fluid Laboratory for PBL Education

研究代表者

高藤 圭一郎 (Takato, Keiichiro)

横浜国立大学・大学院工学研究院・講師

研究者番号：10461485

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：工学教育において、流体に関連する様々な課題解決に必要となる思考力と判断力の向上のためには、流体現象を正しく見せること、加えて簡易的な計測が重要であるが、その実現は難しい。本研究では、正しく見せることと簡易的な計測のために、簡易的に、安価に、安全に実施できる可視化法と計測法、および実験装置群から成る「ポータブル流体実験室」を提案し、実装した。また、多くの構成要素を3DCADによって設計し、3Dプリンターを用いて、簡易的に、安価に製作できることを示した。さらに、要素の製作、およびポータブル流体実験室を用いた流体実験をPBL教育に取り入れることで、流体力学の基礎力向上に資することを示唆した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

工学教育において、実際の物理現象に触れる機会は実験を通して提供され、モノづくりにおける思考力と判断力向上に資するとされる。しかし、流体現象に関しては、大がかりな設備が必要になり、座学による説明ですまされることが多く、教育効果が十分に得られないことが指摘されている。本研究の成果「ポータブル流体実験室」は、簡易的に、安価に、安全に、実際の流体現象に触れる機会を提供できる。これにより流体力学の基礎力向上につながるものと考えられる。また、3DCADによる要素の設計、3Dプリンターによる製作、製作物を用いた実験という一連のながれを取り入れた教育は、PBL教育の手本となるものであり、その点の意義も大きい。

研究成果の概要(英文)：In engineering education, it has been shown that in order to improve the ability to think and make judgments necessary for solving various problems related to fluids, it is important to show fluid phenomena correctly and to make simple measurements, but these are difficult to achieve.

In order to show fluid phenomena correctly and measure them easily, we proposed and realized a "portable fluid laboratory" consisting of simple, inexpensive, and safe visualization and measurement methods and a group of experimental devices in this study. It was also shown that many of the components could be designed by 3D CAD and fabricated simply and inexpensively by using a 3D printer. Furthermore, it was suggested that the fabrication of the elements and the fluid experiments using a portable fluid laboratory can contribute to the improvement of basic skills in fluid mechanics by incorporating them into PBL education.

研究分野：工学教育

キーワード：流体実験 ポータブル実験装置 PBL教育 可視化 視線計測 3Dプリンター 3DCAD設計

様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

簡便な CAE 手法が普及し、工学教育においても CAE の果たす役割は大きくなっている。一方、扱う問題に対して CAE の適用条件を満たすか否かの判断が出来ない、また入力の違いなどから生じる結果の不具合を見抜けない学生や新人技術者が増えていることが指摘されている。これが生産性の低下や工業製品のリコールなどを引き起こす主因になっているという指摘も多い。

我々は、この状況を改善するために PBL 教育による思考力と判断力向上の可能性について検討を始めた<sup>①</sup>。例えば、実際に形状を変えた竹とんぼを作らせて、どのような飛行結果になるかを調べさせ、CAE の結果との比較を行い、竹とんぼの空力要素に関する知識を身につけさせるという方法である。しかし、竹とんぼの製作と飛行実験や CAE の結果との比較のみでは、思考力と判断力に必要な基礎力の向上は難しく、また流体現象の理解が根本的に欠けている学生が多いこともわかってきた。

工学教育においては、物理現象に触れる機会は実験を通して提供されることが多いが、流体現象に関しては、風洞実験や水槽実験のような大がかりな設備が必要になり、座学による説明でまされることが多い。結果として流体現象に触れる機会が少なくなる。

我々は、このような状況を鑑み、PBL 教育に流れの可視化実験を加えることを試みた<sup>②</sup>。結果として、Fig.1 に示すような、粉体を上部から降らせるという簡単な可視化であっても流体現象に興味を示すようになり、現象の理解が基礎力の向上につながる可能性が見出された。また、より精密な実験が効果的である一方で、簡易的に実施できることが学習効果を高める上で必要になることがわかってきた。すなわち、流体に関連する様々な課題解決に必要な思考力と判断力の向上のためには、流体現象を正しく見せること、加えて簡易的な計測が必要になる。これが本研究の着想に至った経緯である。



Fig.1 竹とんぼの翼端渦の可視化

### 2. 研究の目的

ある程度の広領域を対象とした、簡易的に、安価に、安全に実施できる流れの可視化法と計測法、および実験装置群を「ポータブル流体実験室」と呼び、その構築を試みる。また、ポータブル流体実験室の構築に必要な要素技術の開発と実験室を用いた流体実験を PBL 教育に取り入れることで、流体力学の基礎力向上を目指す。

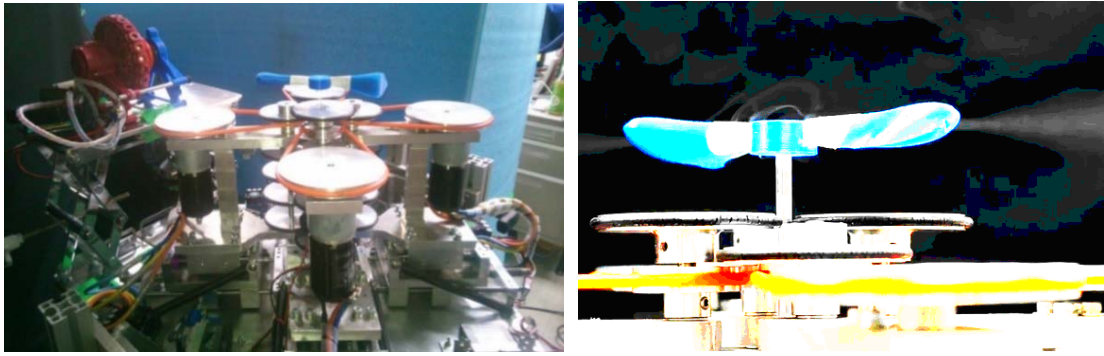
### 3. 研究の方法

ポータブル流体実験室の構築と実験を介した PBL 教育の実施のために、4つのサブテーマ：

- ① 安全かつ明瞭なシート光生成装置、及びトレーサー発生装置の開発
- ② 回転翼試験装置の開発
- ③ ポータブル流体実験室の試作
- ④ 実験の見方の教示手法の開発

を設定し、各研究内容の相互関係を鑑みながら研究を逐行する。また、簡易的に、安全に実施できるという点で、特別な設備の無い教室や屋外などで可視化および計測が実施できることを条件とする。この条件では、計測機材の設置制約の緩和、安全面の確保、可視化および計測に用いるトレーサーの回収などが課題になる。研究期間内で一つ一つの課題の解決策を明らかにし、ポータブル流体実験室を構成する要素技術の要件をまとめる。また、多くの要素を 3DCAD で設計し、3D プリンターを用いて試作し、評価する。

より具体的には、①に対しては、これまでの研究において開発済みの回転方式複数光源によるシート光生成装置の改良を試みる。従来のものよりも視認性が高く、教室内の運用でも安全なシート光生成を可能にする生成装置を製作し、簡便な可視化実験を行うことによってその性能を評価する。②に対しては、回転翼試験装置をポータブル流体実験室の要素とし、回転翼まわりの流れの可視化や空力性能の評価実験を、特別な設備の無い教室や屋外などで実施できるようにする。③では、2つの方式のポータブル流体実験室を試作し、その性能、および可搬性について評価する。④では、可視化結果を分析する際の被験者の視線を計測し、その見方を明らかにする。



(a) 竹とんぼ発射台とシート光生成装置 (b) 回転翼部分拡大図

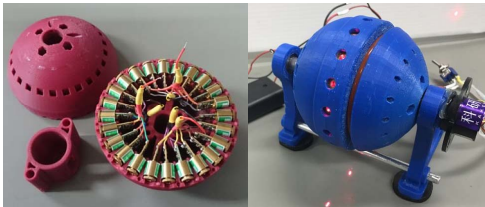
Fig. 2 竹とんぼ発射台と注入トレーサー法による可視化例

#### 4. 研究成果

設定した①～④のサブテーマに対して、それぞれ以下の成果が得られた。

##### ① -1: 「シート光生成装置の改良」

流れの可視化においてシート光源は特に重要な役目を果たす<sup>③</sup>。低出力のレーザーポインタを利用した回転方式複数光源によるレーザーシート生成装置を 3DCAD で設計後、3D プリンターによって製作し、レーザー数を増加させつつ、回転剛性を上げるという改良を行った。改良により、シート光の厚みを更に薄く、かつ明るくすることが出来た (Fig. 3)。



レーザー光源回転部(左)と生成器全体(右)

Fig. 3 改良型シート光生成装置



装置外観(左)と煙発生時(右)

Fig. 4 トレーサー発生装置

##### ① -2: 「トレーサー発生装置の開発」

市販の安価なフォグマシンではエチレングリコールと水を主成分とするリキッドを気化させることで煙が生成される。しかし、この煙の継続排出が難しく、また電源は家庭用 100V 電源以上という欠点がある。そこで、ニクロム線による加熱ユニットと温度センサー、Arduino による温度制御ユニットから構成される簡便なトレーサー発生装置を開発した<sup>④</sup>。Fig. 4 は、3DCAD によって設計し、3D プリンターによって製作したものである。この装置は大きさも市販品の数分の 1 であり市販のラジコン用バッテリー駆動により可搬性も増している。①-1 の光源と①-2 のトレーサー発生装置を利用することにより、簡易的に、安価に、安全に実施できる流れの可視化装置を開発した (Fig. 5)。この可視化装置を用いた渦輪の断面の可視化例を Fig. 6 に示す。上図は通常の照明下、下図は暗室状態での可視化例である。

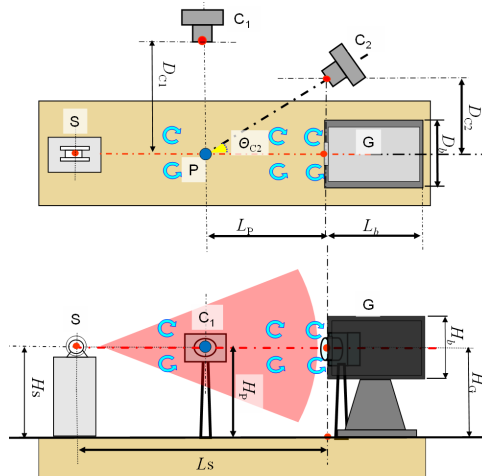


Fig. 5 可視化装置の全体配置図

②：「回転翼試験装置の開発」

Fig. 2 に示す竹とんぼ発射台を小型化し、回転翼試験装置を開発した。Fig. 7 のように1つのモーターから歯車を経由して4つの軸に締結されたタイヤ群に動力を分配することで小型化を実現した。実装の鍵となる歯車を3DCADによって設計し、3Dプリンターによって製作した (Fig. 8) <sup>⑤⑥</sup>。Fig. 2 に示す竹とんぼ発射台の搬送に要する人員が数名であるのに対し、新しい構造の回転翼試験装置は1名での搬送が可能である。

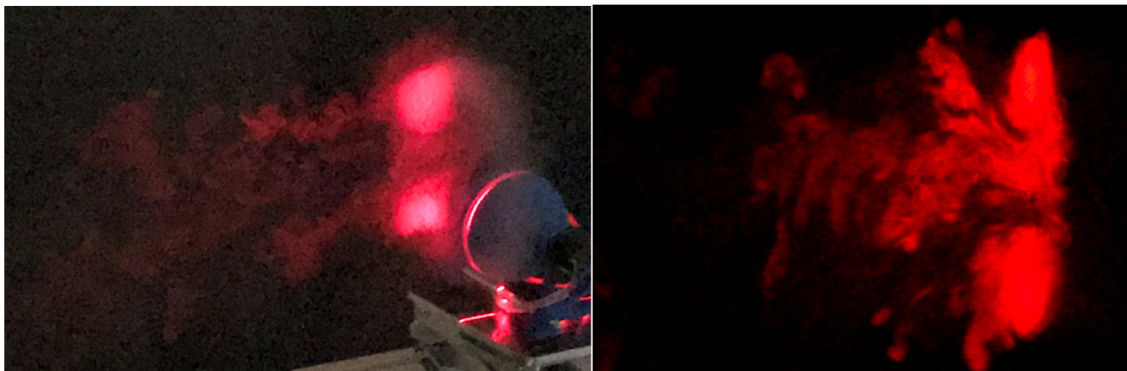


Fig. 6 通常照明下と暗室状態での渦輪の可視化

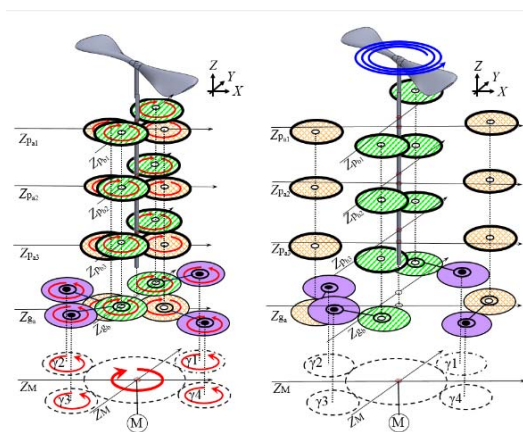


Fig. 7 回転翼試験装置の機構図

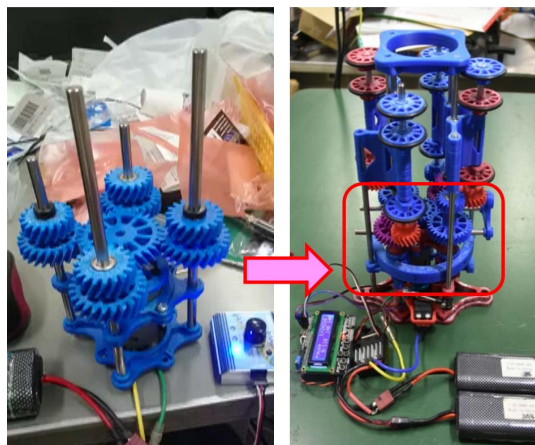


Fig. 8 回転翼試験装置(モータ歯車部)

③ -1: 「オープン型ポータブル流体実験室」

屋内外の空間をそのまま利用し、①-1のシート光生成装置、①-2のトレーサー発生装置、②の回転翼試験装置の組み合わせで行える実験をオープン型のポータブル流体実験とし、広義の流体実験室と呼ぶことにする。はじめに、一般教室内で空気砲からの渦輪の可視化によってその有用性を示した<sup>⑦</sup>。次に、回転翼試験装置に煙配管を追加し (Fig. 9)、シート光生成装置を組み合わせることで (Fig. 10)、直接注入トレーサー法による可視化を実現した<sup>⑤</sup>。Fig. 11 に実験室の全体図を示す。この実験室内で翼端渦の可視化が行えることを確認している (Fig. 12)。また、2回転程度飛翔した過渡状況の翼端渦の観察と動画撮影にも成功した。なお、Fig. 11 上面図に示す赤色の4角枠は、Fig. 2 の竹とんぼ発射台の大きさである。

③ -2: 「フレーム型ポータブル流体実験室」

アルミフレームで可搬性に優れた小型実験風洞を作成し、①-1のシート光生成装置によって円柱や球周りの流れの可視化を行った。いくつかの実験結果から、可搬性を重視したアルミフレームによる実験風洞では、カルマン渦などの主要な流体现象の観察は難しいことが明らかになった。一方で、構築したシート光生成装置によって安全に流れの可視化が実現されることが示された。これにより、カルマン渦を捉える等の改良のための目標を明確に設定できるので、PBL教育の題材に適するものになりうる。

④：「可視化結果の見方の教示手法」

ポータブル流体実験室は、流れの可視化を手軽に実現し、流体力学の基礎力向上に資することを目的として構築される。①から③により、流れの可視化が手軽に実現できることが示された。一方で、流れのどの部分に注目すべきかを伝えることは難しい。この点に対して、教師(熟練者、あるいは専門家)の可視化の見方を視線計測によって明らかにすることを試み、いくつかの特徴的な見方が存在することを示した<sup>⑧</sup>。

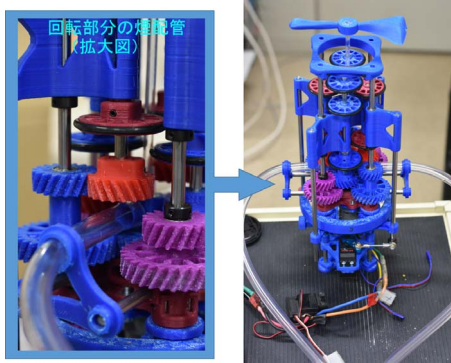


Fig. 9 注入トレーサー法用の煙配管の追加

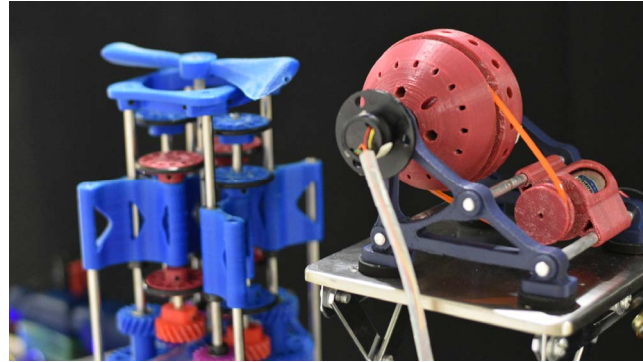


Fig. 10 回転翼試験装置とシート光生成装置

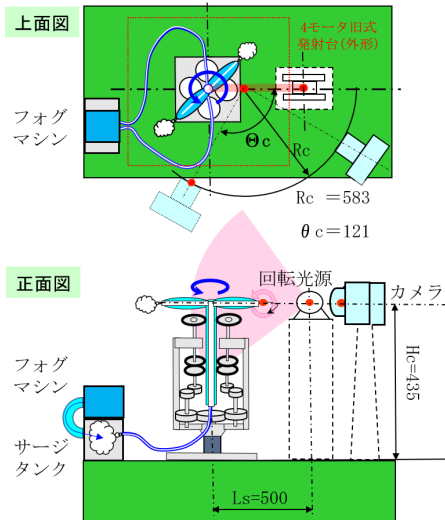


Fig. 11 実験室の全体図

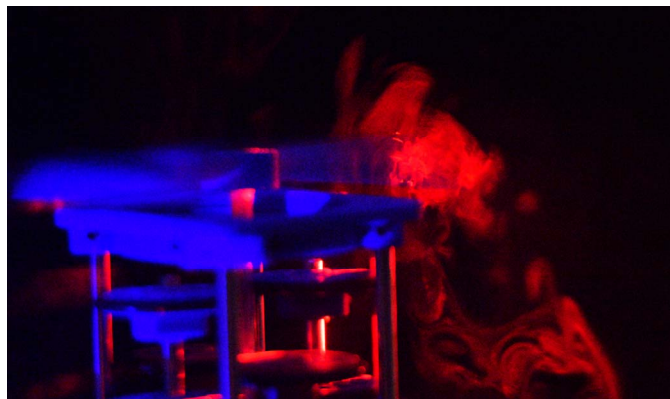


Fig. 12 翼端渦の可視化(暗室状態)

結語として、本研究をまとめる。

流体に関連する様々な課題解決に必要な思考力と判断力の向上のために、流体现象を正しく見せること、加えて簡易的な計測が重要である。正しく見せることと簡易的な計測のために、ある程度の広領域を対象とした、簡易的に、安価に、安全に実施できる流れの可視化法と計測法、および実験装置群から成る「ポータブル流体実験室」を提案し、その構築に必要な要素技術を明らかにし、実装した。実装において、3DCADを用いてほとんどの要素を設計し、3Dプリンターによって製作し、簡易的に、安価に実装できることを示した。例えば、渦輪の可視化に用いたポータブル流体実験室の構築に要する費用は、小中学校の理科教育教材の購入費用に収まる程度である。

また、要素の製作、およびポータブル流体実験室を用いた流体実験をPBL教育に取り入れることが、流体力学のさらなる基礎力向上に資することを示唆した。

<引用文献> (計8件)

- ① Keiichiro TAKATO, Toshiro MAEZONO, Susumu SHIRAYAMA, Influence of Childhood Activities on Engineering Anticipation Capability and Capability Reinforcement through PBL, The International Conference on Business & Technology Transfer (ICBTT)/TS 2018
- ② 高藤圭一郎, 白山晋, PBL教育としての竹とんぼまわりの流れの可視化実験, 日本機械学会講演論文集 No.16-1, G2000104, 2016
- ③ 高藤圭一郎, 白山晋, 回転方式複数光源によるシート光生成装置の改良, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, GS21, 2016
- ④ 高藤圭一郎, 3DプリンターとArduinoを用いた概念設計から実験までの工学教育, 日本機械学会講演論文集 No.18-1, J2010203, 2018
- ⑤ 高藤圭一郎, 歯車式竹とんぼ小型発射台の改良とその教育効果, 日本機械学会講演論文集 No.18-58, U00016, 2018
- ⑥ Keiichiro TAKATO, Susumu SHIRAYAMA, Development of a 3D-printed device evaluating the aerodynamic performance of rotary wings, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol.12, No.1, 2018
- ⑦ 高藤圭一郎, 白山晋, 熱溶解積層型3Dプリンターを用いた工学教育教材の設計と製作及びその教育効果, 機械学会講演論文集, No.178-1, pp.23-24, 2017
- ⑧ 白山晋, 高藤圭一郎, 大澤理恵, 盆子原直己, 視線分析による竹とんぼの飛ばし方の定量的記述に関する基礎的研究, 人工知能学会研究会資料, SIG-KST-030-06, 2017

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 2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 TAKATO Keiichiro	4. 巻 2019
2. 論文標題 A Trial of Making a Small Experimental Wind Tunnel for Engineering Education using FDM 3D Printer	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Proceedings of the Tecnology and Society Conference	6. 最初と最後の頁 G190320 ~ G190320
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jsmetsd.2019.G190320	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 TAKATO Keiichiro	4. 巻 2019
2. 論文標題 Current Situation of Mechanical Engineer Education by Low-budget Fused Deposition Modeling 3D Printer	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Proceedings of Mechanical Engineering Congress, Japan	6. 最初と最後の頁 S20219 ~ S20219
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jsmemecj.2019.S20219	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 TAKATO Keiichiro	4. 巻 2018
2. 論文標題 Education from Conceptual Designs to Experiment Verification Process, Using 3D Printer and Arduino	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Proceedings of Mechanical Engineering Congress, Japan	6. 最初と最後の頁 J2010203
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jsmemecj.2018.J2010203	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 TAKATO Keiichiro	4. 巻 2018
2. 論文標題 Improvement of a Gear Driven "Taketombo" Small Launcher and its Educational Effect	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Proceedings of the Tecnology and Society Conference	6. 最初と最後の頁 G180414 ~ G180414
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jsmetsd.2018.G180414	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 TAKATO Keiichiro、SHIRAYAMA Susumu	4. 巻 12
2. 論文標題 Development of a 3D-printed device evaluating the aerodynamic performance of rotary wings	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 JAMDSM0027
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jamdsm.2018jamdsm0027	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 TAKATO Keiichiro、MAEZONO Toshiro、SHIRAYAMA Susumu	4. 巻 2018.8
2. 論文標題 Influence of Childhood Activities on Engineering Anticipation Capability and Capability Reinforcement through PBL	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The International Conference on Business & Technology Transfer	6. 最初と最後の頁 22 ~ 30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jsmeicbtt.2018.8.0_22	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 TAKATO Keiichiro	4. 巻 2018.71
2. 論文標題 Engineering education using FDM 3D printer and simulating continuous product development	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Proceedings of Conference of Kyushu Branch	6. 最初と最後の頁 E32 ~ E32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jsmekyushu.2018.71.E32	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 BONKOHARA Naoki、SHIRAYAMA Susumu、TAKATO Keiichiro	4. 巻 2017.27
2. 論文標題 Extracting Design Information for a Launch Pad of Flying Dragonfly Propeller from Behavior Analysis Using Eye Tracking Data	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Proceedings of Design & Systems Conference	6. 最初と最後の頁 3304 ~ 3304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jsmedsd.2017.27.3304	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 白井結哉, 白山晋	4. 巻 -
2. 論文標題 視線計測を用いた3次元可視化結果の見方の分析	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 第31回数値流体力学シンポジウム 講演論文集	6. 最初と最後の頁 C08-4
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 高藤圭一郎, 白山晋	4. 巻 Vol.37, No.1
2. 論文標題 回転翼まわりの流れに対する可視化装置の開発	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 第45回可視化シンポジウム 講演論文集	6. 最初と最後の頁 C214
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 TAKATO Keiichiro, SHIRAYAMA Susumu	4. 巻 2017.27
2. 論文標題 3D-printed Device for Evaluating the Aerodynamic Performance of a Rotary Wing	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Proceedings of Design & Systems Conference	6. 最初と最後の頁 3305 ~ 3305
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jsmedsd.2017.27.3305	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 TAKATO Keiichiro, SHIRAYAMA Susumu	4. 巻 2017.7
2. 論文標題 An engineering program of design and manufacturing of educational materials through a fused deposition modeling 3D printer and the educational effects of the program	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Proceedings of Conference of Kyushu Branch	6. 最初と最後の頁 112 ~ 112
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jsmekyushu.2017.70.112	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14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 高藤圭一郎
2. 発表標題 低予算のFDM型3Dプリンターを用いた技術者教育の現状
3. 学会等名 日本機械学会 2019年度 年次大会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高藤圭一郎
2. 発表標題 FDM 3D プリンターを用いた工学教育のための小型実験風洞製作の試み
3. 学会等名 日本機械学会 技術と社会部門 講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高藤圭一郎
2. 発表標題 3DプリンタとArduinoを用いた概念設計から実験までの工学教育
3. 学会等名 日本機械学会 2018年度 年次大会講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Keiichiro Takato
2. 発表標題 Influence of Childhood Activities on Engineering Anticipation Capability and Capability Reinforcement through PBL
3. 学会等名 The International Conference on Business & Technology Transfer 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高藤圭一郎
2. 発表標題 歯車式竹とんぼ小型発射台の改良とその教育効果
3. 学会等名 日本機械学会 技術と社会部門 講演会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高藤圭一郎
2. 発表標題 3Dプリンターを用いた企業での継続的な製品開発を模擬した工学教育
3. 学会等名 日本機械学会 九州支部 第71期総会・講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Keiichiro Takato
2. 発表標題 Development of a 3D-printed device evaluating the aerodynamic performance of rotary wings
3. 学会等名 ecodesign2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高藤圭一郎
2. 発表標題 回転翼まわりの流れに対する可視化装置の開発
3. 学会等名 第45回可視化情報シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高藤圭一郎
2. 発表標題 3Dプリンターを用いた回転翼の空力性能評価装置の開発
3. 学会等名 日本機械学会第27回設計工学・システム部門講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 盆子原直己
2. 発表標題 視線計測からの動作分析を利用した竹とんぼの発射装置に対する設計情報の抽出
3. 学会等名 日本機械学会第27回設計工学・システム部門講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高藤圭一郎
2. 発表標題 熱溶解積層型3Dプリンターを用いた工学教育教材の設計と製作及びその教育効果
3. 学会等名 日本機械学会 九州支部 第70期総会・講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 白山 晋
2. 発表標題 視線計測を用いた3次元可視化結果の見方の分析
3. 学会等名 第31回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2017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	白山 晋  (Shirayama Susumu)  (10322067)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授   (12601)	2020年に定年退職

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
---------	---------