

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 18 日現在

機関番号：55402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26350217

研究課題名(和文) 機械系学習者のための運動・振動学習用教材の開発

研究課題名(英文) Development of educational materials on motion and vibration for mechanical engineering students

研究代表者

瀧口 三千弘 (TAKIGUCHI, Michihiro)

広島商船高等専門学校・商船学科・教授

研究者番号：10163346

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、主として機械系学習者を対象にした、動力学問題(運動と振動)学習用教材の開発を行った。具体的には、物理等における力学問題(等(角)速度運動と等(角)加速度運動)を公式を一切使わずに解くための教材開発、運動方程式を数値計算により解き、解析結果をグラフィック出力するという一連の作業を支援するためのソフトウェア(教育用運動シミュレーションシステム(DSS)：研究代表者が開発)への新しい機能の追加、運動や振動現象(とりわけ共振と振動モードに注目)の観察を目的とした各種実験装置の開発である。さらには、DSSを有効に使うための運動・振動問題学習プログラムについても提案した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we mainly developed the teaching materials on the issue of dynamics (motion and vibration) for mechanical engineering students. Major results obtained are summarized as follows: (1) Development of the teaching materials to solve a lot of practice problems related to uniform motion and uniformly accelerated motion by using a graphical method without using formula. (2) Development of various experimental devices for the purpose to observe of motion and vibration phenomena, especially a resonance and a natural vibration mode. (3) In previous studies, the Principal Investigator has developed a software called DSS which supports the sequence of operation of numerically solving the motion equation and displaying the analytical results graphically. This time a new function called MOVIE was added to DSS to be able to watch a real vibration phenomenon. Furthermore, a learning program is proposed for motion and vibration by using DSS.

研究分野：工学教育

キーワード：運動 振動 運動方程式 物理 機械系 学習用教材 ソフトウェア 実験装置

1. 研究開始当初の背景

(1) 機械系の動力学問題（とりわけ運動と振動）を学習する過程で、物理の力学等において学ぶ「等(角)速度運動」と「等(角)加速度運動」に関する問題は、力学問題の基礎基本（例えば、(角)変位-(角)速度-(角)加速度の関係等）を学ぶ上で非常に重要である。一般に教科書を含む多くの教材において、これらの問題には基本公式が用意され、これを用いることによって解を求める。しかしながら、公式に頼るばかりに、力学問題の基礎基本が身につかない学習者がかなりいる。

(2) 動力学問題の学習において重要になるのが、「運動方程式」を求めるということである。一般に運動方程式が求まれば、次にはそれを解析的に解くということが行われる。力学問題の本質を理解するためには避けて通れないところでもある。しかしながら、こうした学習の進め方だけでは学習者に十分な理解が得られない場合がある。その理由としては、問題を解析する過程において多くの数学的知識が必要になることや、少し複雑な運動方程式になると解析解を求めることは容易でない（場合によっては求まらない）からである。

(3) さらに進んで、動力学の中でもとりわけ「振動問題」の学習においては、共振や振動モードといった問題の本質を知ることが重要である。そのためには、上記のような運動方程式を用いた解析と併せて実験による確認ができれば大きな教育効果が期待できる。しかしながら、誰もが簡単に製作・操作できるような適当な教材は少ない。

(4) これまで研究代表者は、まず上記(2)に注目し、得られた運動方程式をそのまま用いた数値計算によるシミュレーションを行うためのソフトウェア（教育用運動シミュレーションシステム：DSS）の開発を進めてきた。DSSを用いたシミュレーションの基本的なイメージを図1に示す。なお、本DSSはVisual Basicで記述されておりWindows上で動く。さらに、このDSSを用いた教育の導入部分で、上記(1)の問題に気付きその解決方法を模索してきた。また、振動問題の学習にDSSを用いたシミュレーションと併せて、上記(3)に示した実験装置を用いた振動挙動の観察（とりわけ共振や振動モード）が非常に有効であることを確認している。

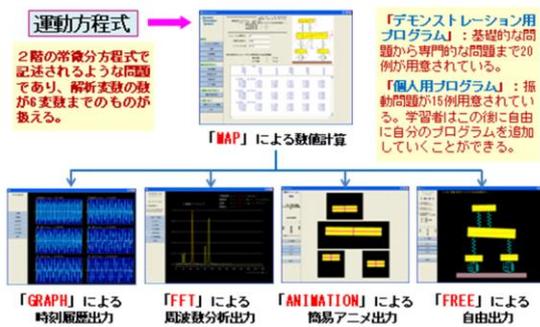


図1 DSSのイメージ図

2. 研究の目的

本研究では、主として機械系学習者を対象にした、動力学問題（運動と振動）学習用教材の開発を目的とする。具体的には、①物理等における力学問題（等(角)速度運動と等(角)加速度運動）を、公式を一切使わずに解くための教材開発、②DSSの改良（新しい機能の追加等）、③運動や振動現象（とりわけ共振と振動モードに注目）の観察を目的とした各種実験装置の開発を行う。④得られた教材を用いた動力学問題（運動と振動）学習プログラムを作成する。

3. 研究の方法

(1) 等(角)速度運動と等(角)加速度運動を、公式を一切使わずに解くための教材開発を行う。物理等の力学における「等(角)速度運動」と「等(角)加速度運動」の問題を整理すると、概ね表1のように分類することができる。これらの問題の全てを図2に示すような変位-速度-加速度の関係（角変位-角速度-角加速度の場合も同様）を利用して、公式を一切使わずに図式解法により解き、教材化する。

表1 物理等の力学問題の分類

|     |                         |
|-----|-------------------------|
| 1   | 等速度運動の問題                |
| 2   | 等加速度運動の問題               |
| 2.1 | 一般問題                    |
| 2.2 | 自由落下問題                  |
| 2.3 | 鉛直投げおろし、投げ上げ問題          |
| 3   | 等速度運動と等加速度運動を同時に扱う問題    |
| 4   | 放物線運動の問題                |
| 4.1 | 水平投射問題                  |
| 4.2 | 斜方投射問題                  |
| 5   | 等角速度運動、等角加速度運動（回転運動）の問題 |
| 5.1 | 等角速度運動問題                |
| 5.2 | 等角加速度運動問題               |

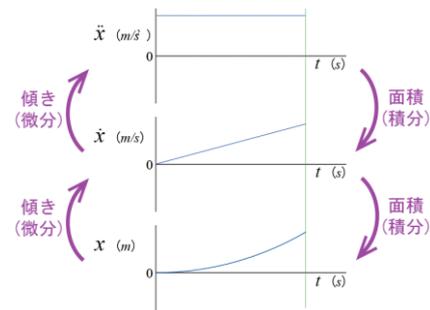


図2 変位-速度-加速度の関係

(2) 実験装置を用いて得られた共振現象の観察結果（動画）をDSS上で見るように、プログラムの改良を行う。具体的には、図1に示したDSSを用いた解析結果の出力（4つの出力方法）と併せて、実際の動きを動画でも見るようにする。

(3) 現有のDSSの中のテーマ（35例）の中から自動車の振動（直線と回転の連成振動：2自由度問題）、凹形の剛体と円柱からなる振動（直線と回転の連成振動：2自由度問題）、ねじり振動（専門的な問題：3自由度問題）、

クレーンの巡回運動（運動方程式が複雑な問題：3自由度問題）、ぶらんこの運動（係数励振という特殊な振動：2自由度問題）等の実験装置を開発する。開発にあたっては、DSSによるシミュレーションを有効に利用する。

(4) 今回開発する教材は、各々でも十分な教育効果が期待できるが、上手にプログラム化して利用すると、さらなる教育効果が期待できるものと思われる。学習者の意見等も参考にしながら動力学問題（運動と振動）学習プログラムを作成する。

#### 4. 研究成果

(1) 等(角)速度運動と等(角)加速度運動問題の図式解法：表1に示した分類にしたがって、本研究では合計59例の問題（参考文献として、①高校物理研究会・啓林館編集部：物理Iの基本練習改訂版、新興出版社啓林館(2010)、②第一学習社編集部：セミナー物理I+II、第一学習社(2010)、③原康夫：改訂版基礎物理学、学術図書出版社(1999)、④青木弘・木谷晋：工業力学 第3版、森北出版(2004)を用いた。)を、全て図式解法を用いて解いた。

具体例として、次の斜方投射問題に対する図式解法例を図3に示す。

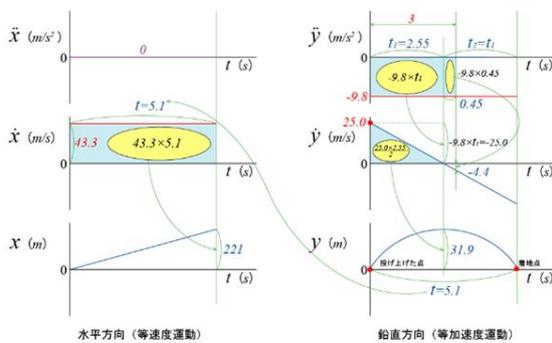
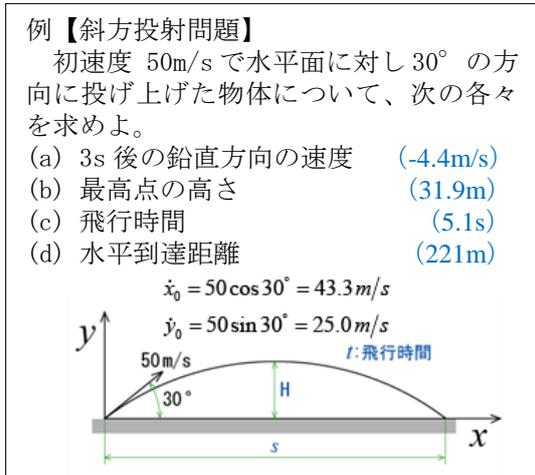


図3 図式解法の一例

本教材においては、次の①→②→③の手順で問題を解き、問題を解いた過程をわかりやすくするために、【 】中に示す色を使って

図の整理をした。

①問題から与えられた情報を、直線運動問題については「変位-速度-加速度図」に、回転運動問題については「角変位-角速度-角加速度図」に、点と線及び文字【赤色】で記入する。

②与えられた情報をもとに、問題で問われていることを、線と文字【青色】を使って解答していく。その際、計算過程【黒色】も記入する。

③問われていないことでも、線と文字【紫色】を使って記入し、全ての図を完成する。

④上述の①、②、③を行う際、解答の過程をわかりやすくするために、できるだけ補助線、説明線【緑色】を入れる。

また、本図式解法では、次のことを約束事とする。

- ・傾きを求めた箇所には「 $\triangle$ 」を付け、計算過程【黒色】を書く。

- ・面積を求めた箇所【水色】には「○」を付け、その中に面積計算を書く。【○の中は黄色】

なお、学習者が実際の問題を解く際は、色を気にする必要は全くない。ただし、上述の①の記入に際して赤色を使うと、問題の意味が良くわかる。

(2) DSSの改良：実験装置を用いて得られた共振現象の観察結果をDSS上で見るための新たなプログラムを組み込み、DSSを再構築した。図1に示したDSSを用いた解析結果の4つの出力方法と併せて、実際の動きをビデオ動画でも見ることができるといったものであり、「MOVIE」と名付けた。

図4に、「MOVIE」を用いてDSSに取り込んだビデオ動画画面の一例を示す。学習者はシミュレーション結果の動画（「ANIMATION」か「FREE」を用いる。）と「MOVIE」による動画から、両者が同じ動きであることを確認できる。

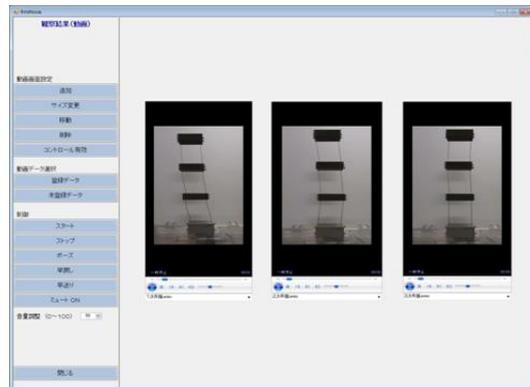


図4 「MOVIE」を用いてDSSに取り込んだビデオ動画画面の一例

なお、DSSは改良後、デモ用プログラム（その1）として基礎的な問題から応用的な問題までの20例、デモ用プログラム（その2）として振動問題のみを集めた15例、実験教

材用の解析プログラムが 14 例組み込まれたものとなった。実験教材用の 14 例では「MOVIE」を用いて取り込まれたビデオ動画を見ることができる。DSS に組み込まれた、これら 49 例は、DSS を用いる上での多くのノウハウを含んだ内容となっている。また、学習者が自分用のプログラムを DSS に自由に作成・追加することも当然できる。

(3) 加振装置とパッケージ型加振体の開発：図 5 に、開発した加振装置の外観を示す。本装置の性能は、一台で水平及び垂直方向の加振ができること、発生周波数を 0.5~20Hz の範囲で調整できること（周波数表示付き）、加振量（振幅）の調整（1~5mm までの 5 段階切り替え）ができること等である。

図 6 に、パッケージ型加振体（A4 ファイル程度の大きさ）を示す。現時点ではまだ試作品の段階であるが、水平方向用 5 個、垂直方向用 5 個が完成している。本加振体の特徴は、加振体をパッケージ化したことにより、薄型・軽量で保管・持運びが便利なことである。より多くの教育機関で使っていただくことを目的にメーカー（有インテス）と共同で実用化を目指している。

表 2 に水平方向用加振体の共振時の実験結果と解析結果の比較を、表 3 に垂直方向用加振体の共振時の実験結果と解析結果の比較を示す。いずれも、実験結果と解析結果はよく一致していることがわかる。また、加振装置の振動数範囲内（0.5~20Hz）で、目的とする 1~3 次の共振が発生していることもわかる。



図 5 加振装置の外観

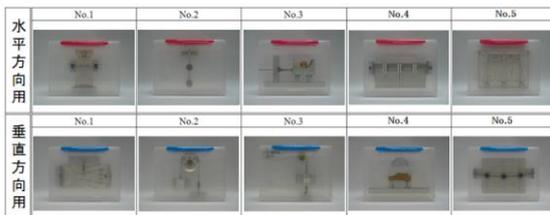


図 6 パッケージ型加振体

表 2 水平方向用加振体の共振時の実験結果と解析結果の比較

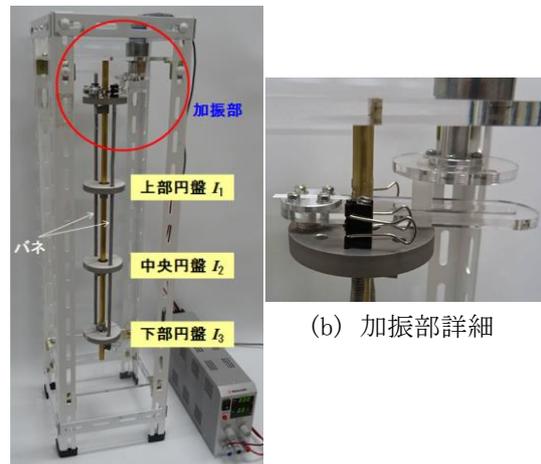
| No. | テーマ         | 自由度 | 1次   |      | 2次   |      | 3次   |      |
|-----|-------------|-----|------|------|------|------|------|------|
|     |             |     | 実験   | 解析   | 実験   | 解析   | 実験   | 解析   |
| 1   | 逆立ち振り       | 1   | 3.83 | 3.83 |      |      |      |      |
| 2   | 二重振り        | 2   | 1.40 | 1.41 | 3.30 | 3.28 |      |      |
| 3   | 凹形剛体+円柱の振動  | 2   | 2.35 | 2.25 | 3.80 | 3.71 |      |      |
| 4   | 3自由度のばね・質量系 | 3   | 3.75 | 3.75 | 7.16 | 6.95 | 8.93 | 9.06 |
| 5   | 並列三重振り      | 3   | 1.63 | 1.41 | 2.83 | 2.66 | 4.30 | 4.14 |

表 3 垂直方向用加振体の共振時の実験結果と解析結果の比較

| No. | テーマ            | 自由度 | 1次   |      | 2次   |      | 3次    |       |
|-----|----------------|-----|------|------|------|------|-------|-------|
|     |                |     | 実験   | 解析   | 実験   | 解析   | 実験    | 解析    |
| 1   | 横つり下げ振り        | 1   | 4.95 | 4.92 |      |      |       |       |
| 2   | 滑車・ばね・質量系(その1) | 1   | 3.33 | 3.32 |      |      |       |       |
| 3   | 滑車・ばね・質量系(その2) | 2   | 5.55 | 5.47 | 8.83 | 8.40 |       |       |
| 4   | 自動車            | 2   | 5.42 | 5.37 | 7.75 | 7.81 |       |       |
| 5   | 質量のついた弦        | 3   | 5.30 | 5.08 | 8.97 | 8.98 | 11.75 | 11.13 |

(4) 3 自由度ねじり振動系の実験装置の開発：図 7 に、開発した実験装置を示す。(a) には外観を、(b) には加振部の詳細を示す。実験装置は縦型構造とし、1本の軸に4つの回転円盤（加振円盤、上部円盤  $I_1$ 、中央円盤  $I_2$ 、下部円盤  $I_3$ ）を取り付け、それぞれの円盤を2本のバネで連結し、一番上の円盤を加振することによって下の3つの円盤を振動させる構造である。加振には揺動スライダクラック機構を利用した。

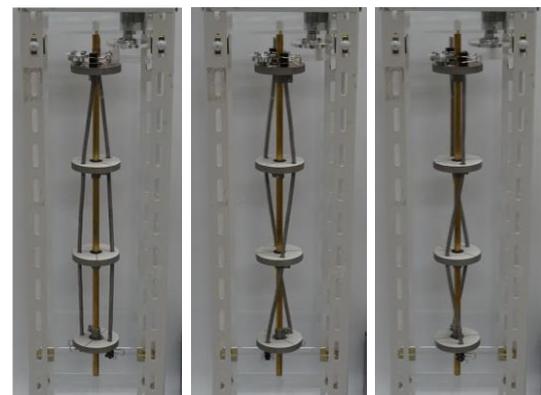
図 8 に、共振時の画像を示す。2本のバネを用いたことにより、1次、2次、3次の振動モードの違いがよくわかる結果となった。



(a) 外観

(b) 加振部詳細

図 7 ねじり振動実験装置



(a) 1次

(b) 2次

(c) 3次

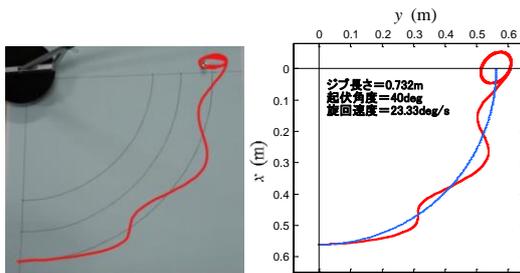
図 8 共振時の画像

(5) クレーンの実験装置の開発：図 9 に、開発したクレーンの実験装置を示す。本装置を用いて、クレーンの旋回運動時のつり荷の挙動を観察することができる。ジブ長さは

0.732~1.0m の範囲で、ジブ起伏角は 20~70deg の範囲で調整可能である。つり荷の重さは現在 0.0575kg 一定としているが、変更も可能である。転倒防止のためカウンターウェイトも取付けてある。旋回速度については、14.61~23.33deg/s の範囲で調整できる。図 10 に、つり荷の挙動の一例(ジブ長さ 0.732m、ジブ起伏角 40deg、旋回速度 23.33deg/s)を示す。(a)が実験結果、(b)がシミュレーション結果である。実験結果とシミュレーション結果がよく一致していることがわかる。



図 9 クレーンの実験装置



(a) 実験 (b) シミュレーション

図 10 つり荷の軌跡の一例

(6) 簡易ぶらんこの開発：図 11 に、開発した簡易ぶらんこを示す。本ぶらんこは、「ぶらんこ」の触れに併せて「おもり」に繋がった「ひも」を上下させることによってぶらんこの触れを大きくする(ぶらんこを漕ぐ)というものである。本ぶらんこは持運びに便利のように折りたたみ式とし、長さ 500mm、重さ 91g と軽量・コンパクトである。

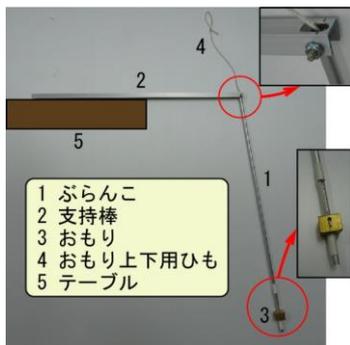


図 11 簡易ぶらんこ

本ぶらんこに適した漕ぎ方をシミュレーションにより検討した結果、図 12 に示す漕ぎ方がよいことがわかった。図 13 に、この漕ぎ方で漕いだ場合の「おもり」の軌跡を示す。ぶらんこ角度の初期値を-15 度とし、約 17 秒でこの状態になる。

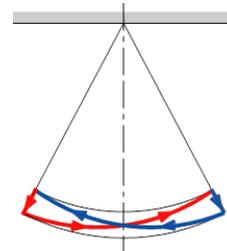


図 12 簡易ぶらんこに適した漕ぎ方

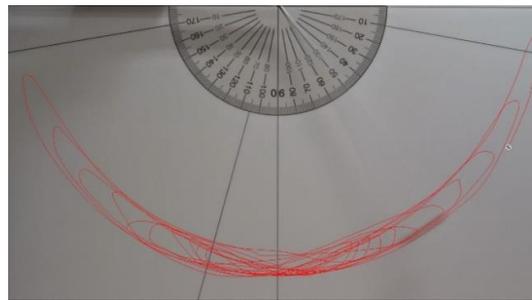


図 13 「おもり」の軌跡

(7) DSS を用いた運動・振動問題学習プログラムの開発：図 14 に、DSS を用いた学習のイメージを示す。この図のように、学習者を学習レベルに応じて次のレベル 1 からレベル 4 の 4 段階に分類し、それぞれのレベルに応じた学習プログラムを提案した。詳細は〔雑誌論文〕の④を見ていただきたい。

①レベル 1 (物理問題学習者)：等速度運動、等加速度運動といった物理の力学問題を学習している人。運動の第 2 法則 (ニュートンの運動方程式) を知っているレベル。

②レベル 2 (基礎力学問題学習者)：レベル 1 の内容が理解でき、剛体の運動 (直線運動、回転運動) といった工業力学問題などを学習している人。直線運動と回転運動の違いがわかるレベル。

③レベル 3 (振動問題学習者)：機械力学や振動工学において基本的な振動問題を学習している人。ニュートンの運動方程式を使って、運動方程式を立てることができるレベル。

④レベル 4 (発展問題学習者)：複雑な動力学問題 (運動・振動問題) を学習している人。必要に応じてラグランジュの運動方程式が使えるレベル。



図 14 DSS を用いた学習のイメージ

(8) 研究の総括：本研究の当初の目的は、概ね達成できた。今後は得られた全ての教材をさらに有効に利用するための学習プログラムの構築と、これら教材の普及が課題である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

- ① 瀧口三千弘、藤原滋泰、藤野俊和、振動現象学習用教材の開発－垂直方向用加振台を用いた自動車モデルの振動－、広島商船高等専門学校紀要、査読無、第37号、2015、pp. 31-37
- ② 瀧口三千弘、藤原滋泰、藤野俊和、振動現象学習用教材の開発－凹形剛体と円柱からなる振動モデル－、広島商船高等専門学校紀要、査読無、第37号、2015、pp. 39-44
- ③ 瀧口三千弘、藤原滋泰、藤野俊和、等速度運動と等加速度運動問題の図式解法、広島商船高等専門学校紀要、査読無、第37号、2015、pp. 45-51
- ④ 瀧口三千弘、藤野俊和、藤原滋泰、徳田太郎、吉田哲哉、教育用運動シミュレーションシステム (DSS) を用いた運動・振動問題学習プログラム、広島商船高等専門学校紀要、査読無、第38号、2016、pp. 117-128
- ⑤ 瀧口三千弘、山元和真、藤原滋泰、藤野俊和、パッケージ型振動体の開発、広島商船高等専門学校紀要、査読無、第38号、2016、pp. 129-133
- ⑥ 瀧口三千弘、藤原滋泰、藤野俊和、振動現象学習用教材の開発－簡易ぶらんこ－、広島商船高等専門学校紀要、査読無、第39号、2017、pp. 39-47
- ⑦ 瀧口三千弘、岩田幸大、藤原滋泰、藤野俊和、振動現象学習用教材の開発－3自由度ねじり振動系－、広島商船高等専門学校紀要、査読無、第39号、2017、pp. 49-54

[学会発表] (計6件)

- ① 瀧口三千弘、藤原滋泰、等速度運動と等加速度運動問題の問題を公式を一切使わずに解くための教材開発、日本工学教育協会平成26年度工学教育研究講演会、2014年8月28日、広島大学
- ② 瀧口三千弘、山元和真、藤原滋泰、藤野俊和、パッケージ型振動現象学習用教材の開発、日本工学教育協会平成27年度工学教育研究講演会、2015年9月2日、九州大学工学部伊都キャンパス
- ③ 瀧口三千弘、機械系の運動・振動学習用ソフトウェアの開発、日本機械学会2015年度年次大会、2015年9月15日、北海道大学工学部
- ④ 瀧口三千弘、藤野俊和、藤原滋泰、徳田

太郎、吉田哲哉、DSSを用いた運動・振動問題学習プログラム、日本工学教育協会平成28年度工学教育研究講演会、2016年9月7日、大阪大学吹田キャンパス

- ⑤ 瀧口三千弘、岩田幸大、藤原滋泰、藤野俊和、機械系の振動現象学習用教材の開発－3自由度ねじり振動系－、日本機械学会2016年度年次大会、2016年9月14日、九州大学工学部伊都キャンパス
- ⑥ 瀧口三千弘、藤原滋泰、藤野俊和、阿部雅二郎、神出明、振動現象学習用教材の開発－加振装置とパッケージ型加振体－、日本機械学会中国四国支部第55期総会・講演会、2017年3月7日、広島工業大学五日市キャンパス

[その他]

これまで開発した振動現象学習用教材を、次のようにYouTubeにアップした。

- ① 3自由度直線振動系  
<https://www.youtube.com/watch?v=00tjTpkLeMM>
- ② 3階建て構造物の振動  
<https://www.youtube.com/watch?v=IKTMqIHmyBc>
- ③ パッケージ型振動体：水平加振  
<https://www.youtube.com/watch?v=E6cLMnMfBw4>
- ④ パッケージ型振動体：垂直加振  
<https://www.youtube.com/watch?v=Wj6lXvkIzIQ>
- ⑤ 3自由度ねじり振動系  
<https://www.youtube.com/watch?v=KU-qSBESVlo>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

瀧口 三千弘 (TAKIGUCHI, Michihiro)  
広島商船高等専門学校・商船学科・教授  
研究者番号：10163346

##### (2) 研究分担者

藤原 滋泰 (FUJIWARA, Shigeyasu)  
広島商船高等専門学校・一般教科・准教授  
研究者番号：20390495

##### (3) 研究協力者

(H26～H28)  
藤野 俊和 (FUJINO, Toshikazu)  
東京海洋大学・学術研究員・助教  
研究者番号：70508514

(H27～H28)  
神出 明 (KAMIDE, Akira)  
有限会社インテス・代表取締役  
(H27のみ)

吉田 哲哉 (YOSHIDA, Tetsuya)  
広島商船高等専門学校・電子制御工学科・教授  
研究者番号：20182769

徳田 太郎 (TOKUDA, Taro)  
広島商船高等専門学校・商船学科・准教授  
研究者番号：20425143  
(H28のみ)

阿部 雅二郎 (ABE, Masajiro)  
長岡技術科学大学・大学院技術経営研究院・教授  
研究者番号：60212552