

# 振動現象学習用教材の開発 ー簡易ぶらんこー

瀧口 三千弘<sup>\*1</sup>, 藤原 滋泰<sup>\*2</sup>, 藤野 俊和<sup>\*3</sup>

## Development of Teaching Material for Vibration Behavior

### ーA Simple Model of a Playground Swingー

Michihiro TAKIGUCHI, Shigeyasu FUJIWARA and Toshikazu FUJINO

In learning the issue of vibration, it is important to know the essence of the various problems in resonance, natural frequency, natural vibration mode, and so on. However, it is really very hard to understand these phenomena. So, we started to develop the experimental equipment for the purpose of observing the vibration of mechanical systems.

In this study, we developed a simple model of a playground swing with 2 degrees of freedom for teaching material. This swing is a compact folding type, so it's convenient to carry. In order to clarify how to use this swing, we simulated in eight patterns by using the software called DSS. As a result, the best way to swing this device was suggested.

KEYWORDS : teaching material, playground swing, simple model, parametric excitation, DSS

#### 1. まえがき

機械系の動力学問題とりわけ「振動問題」の学習において、固有振動数や固有振動モードといったこと等、問題の本質を知ることが重要であるが、実際にはなかなか理解しにくい。

こうしたことから、著者の一人は学習用教材として教育用運動シミュレーションシステム (DSS と呼称) を開発し<sup>1)~3)</sup>, 機械力学の授業や実験実習で活用し効果を上げている<sup>4)</sup>。本システムは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であり、比較的簡単な運動や振動問題は本システムだけで十分理解が可能であるが、少し複雑な運動問題や多自由度系の振動問題となると、実際の動き

がイメージできず理解に苦しむ学生が多い。

そこで、著者らは振動現象の観察を目的とした学習用実験教材の開発を行っている。これまでに、3自由度直線振動系<sup>5)</sup>や3階建て構造物振動系<sup>6)</sup>の実験装置、さらには加振台<sup>7)</sup>やパッケージ型の振動体<sup>8)</sup>を開発し、こうした教材が学習者の理解を助けるのに非常に有効であることを確認している。

本研究では、運動や振動問題に関する授業の導入等で使うことを目的に、持運びに便利な簡易ぶらんこの開発を行った。ぶらんこの運動は振動問題の中では、係数励振<sup>9)</sup>と呼ばれる (パラメータ励振とも呼ばれる) 振動系の係数が周期的に変化することで起こる振動現象である。開発した簡易ぶらんこの最適な漕ぎ方を、DSS を用いたシミュレーションと実験を行い、種々検討したので報告する。

\*1 商船学科

\*2 一般教科

\*3 東京海洋大学 学術研究院 海洋電子機械工学部門

## 2. 簡易ぶらんこ

図1に開発した簡易ぶらんこを示す。(a)には使用時の外観を、(b)には持運び時の外観を示す。

簡易ぶらんこは、「ぶらんこ」(図1(a)中の1, アルミパイプ:  $\phi 6 \times 0.5$ )の触れに併せて、「おもり」(図1(a)中の3, 重さ46g)に繋がった「ひも」(図1(a)中の4)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(本研究では、これを「ぶらんこを漕ぐ」ということにする)というものである。ひもはアルミパイプの中を通してある。

簡易ぶらんこは授業等での使用を目的としており、持運びに便利のように折りたたみ式(図1(b)参照)とした。長さ500mm, 重さ91gと、軽量・コンパクトである。

## 3. 解析

### 3. 1 解析モデル

図2に解析モデルを示す。図中、 $m$ はおもりの質量、 $L$ はぶらんこの支点からおもりの重心の最上部までの長さ、 $L_s$ はおもりの重心の上下変位量である。なお、必要に応じて振動減衰の影響を考慮できるように粘性減衰係数 $D$ を用いるモデルとした。この系の運動方程式を次に示す。

$$my^2\ddot{\theta} = -2my\dot{\theta} - mgy \sin \theta - Dy\dot{\theta} \quad (1)$$

ここで、式(1)中の $y$ と $\dot{y}$ はぶらんこのおもりの上下変位及び速度であり、漕ぎ方によって異なる。解析においては、入力関数として与えた。

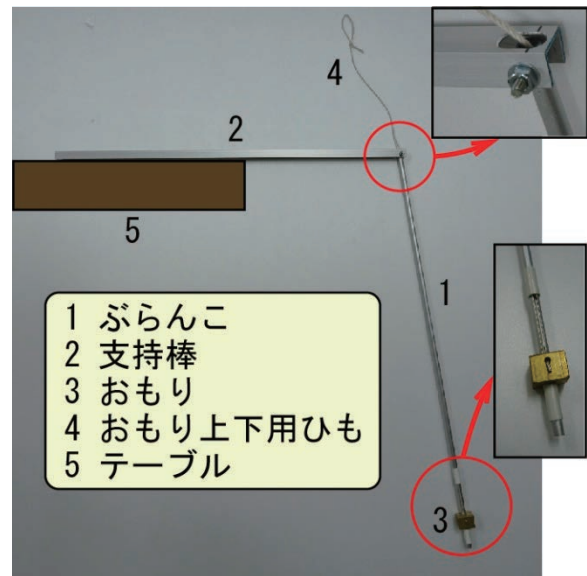
図2中のそれぞれの定数は、 $m=0.04605\text{kg}$ 、 $L=0.425\text{m}$ 、 $L_s=0.037\text{m}$ である。粘性減衰係数 $D$ については後述する。

付録1に、簡易ぶらんこ運動解析用「MAP」プログラムを示す。なお、必要事項のみの記述となっている。

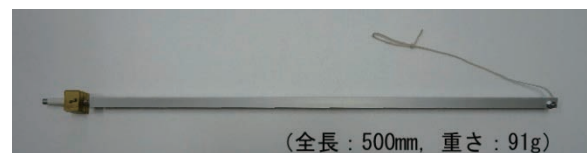
### 3. 2 ぶらんこの漕ぎ方

図3に、本研究で検討した「ぶらんこの漕ぎ方」を示す。簡易ぶらんこに適した漕ぎ方を見つけるために、①～⑧の漕ぎ方について検討した。

漕ぎ方①と②は係数励振振動の特徴である、励振力の振動数が振動系の固有振動数の2倍に等しいときに著しい振動が発生する<sup>8)</sup>ということに対応した



(a) 使用時外観



(b) 持運び時外観

図1 簡易ぶらんこ

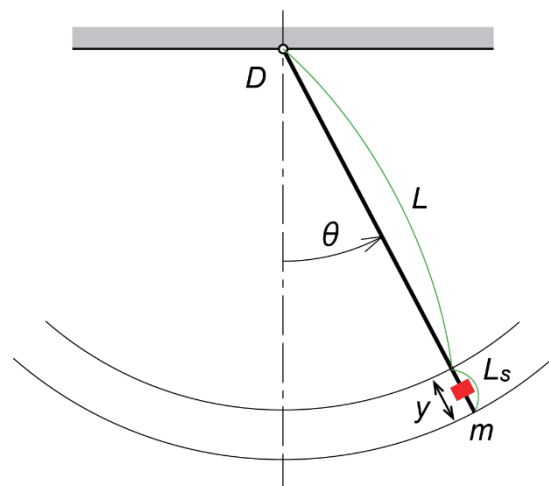


図2 解析モデル

モデルである。漕ぎ方①は、行きは漕いで帰りは休む(2回に1回休む)というタイプであり、漕ぎ方②は往復で漕ぐタイプである。

漕ぎ方③, ⑤, ⑦は、簡易ぶらんこを漕ぐための種々のアイデア(行きは漕いで帰りは休むタイプ)であり、④, ⑥, ⑧はそれぞれ③, ⑤, ⑦を往復で漕ぐタイプである。

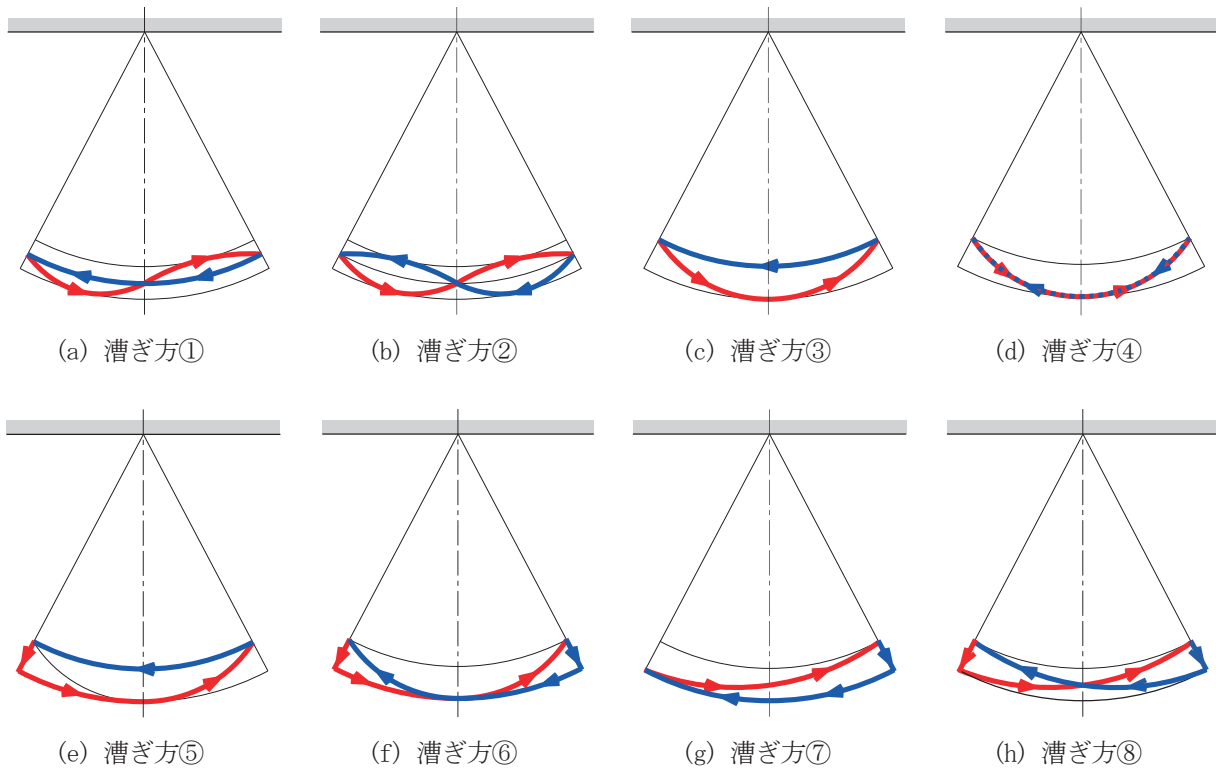


図3 本研究で検討した「ぶらんこの漕ぎ方」

#### 4. 結果及び考察

##### 4. 1 シミュレーションによるぶらんこの漕ぎ方

図4に、図3に示したぶらんこの漕ぎ方に対応した式(1)中の  $y$  と  $\dot{y}$  のシミュレーション波形を示す。それぞれ、補助変数(1)が解析変数  $\theta$ 、補助変数(2)が入力変数  $y$ 、解析変数補助変数(3)が入力変数  $\dot{y}$  である。いずれの波形も、ぶらんこの触れ  $\theta$  に対応しており、簡易ぶらんこを漕いでいる状態になっていることがわかる。

なお、本シミュレーションにおいてはぶらんこの漕ぎ方を議論する関係上、粘性減衰の影響を  $D=0$  として無視した。こうすることによって、その漕ぎ方によってぶらんこが僅かであっても漕げるかどうかを見極めることができるからである。

漕ぎ方に対応した  $y$  と  $\dot{y}$  については、付録1の第1入力変数(重心移動)のように定義した。プログラム中の JYOUTAI=1~8 が、図3の①~⑧に対応している。

漕ぎ方①と②の  $y$  と  $\dot{y}$  の基本式を、次に示す。

$$\left. \begin{aligned} y &= \left( L + \frac{L_s}{2} \right) + \frac{L_s}{2} \sin(2\omega t) \\ \dot{y} &= \omega L_s \cos(2\omega t) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

漕ぎ方③~⑥の  $y$  と  $\dot{y}$  の基本式を、次に示す。

$$\left. \begin{aligned} y &= L + L_s \sin(\omega t) \\ \dot{y} &= \omega L_s \cos(\omega t) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

漕ぎ方⑦と⑧の  $y$  と  $\dot{y}$  の基本式を、次に示す。

$$\left. \begin{aligned} y &= L + L_s \cos(0.5\omega t) \\ \dot{y} &= -0.5\omega L_s \sin(0.5\omega t) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式(2)~式(4)中の  $\omega$  は、簡易ぶらんこの固有円振動数であり、次式のように定義した。

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{L + L_s}} \quad (5)$$

なお、ぶらんこにおいては係数が変化(ぶらんこを漕ぐことによって、ぶらんこの長さは常に変化)しているため、厳密には固有円振動数は存在しない。本シミュレーションにおいては、シミュレーションの都合上、おもりの重心が一番下にある場合の振動数をこの系の固有円振動数  $\omega$  とした。

式(2)~式(4)の基本式については、付録1のプログラムに示すような工夫をして使っている。

また、付録1のプログラム中には、JYOUTAI=9として、でたために漕ぐ場合のシミュレーションもできるようにしている。



図4 ぶらんこの漕ぎ方の違いの比較

注1) 補助変数(1) : 解析変数  $\theta$  (ぶらんこの振り上がり角度 [deg])

補助変数(2) : 入力変数  $y$  (重心の上下変位 [m]) (図中, 下方向を+で表示)

補助変数(3) : 入力変数  $\dot{y}$  (重心の上下速度 [m/s]) (図中, 下方向を+で表示)

シミュレーション時間は, いずれも5秒間のものである。

注2) ぶらんこの漕ぎ方①~⑧は, それぞれ図3に対応している。

#### 4. 2 ぶらんこの漕ぎ方の比較

図5 に, 図3と図4に示した漕ぎ方でぶらんこを漕いだ場合の, ぶらんこの振り上がり角度  $\theta$  を比較したものを示す。いずれもシミュレーション結果であり, 先に述べた理由で減衰は考慮していない。なお, シミュレーションの初期値は  $\theta = -15$  度である。

本結果から, 理論どおり, 漕ぎ方①と②で漕ぐと, ぶらんこはよく漕げることがわかる。漕ぎ方③と④の漕ぎ方は, 漕ぐことはできるが, 短時間で大きく漕ぐことは難しい。漕ぎ方⑤~⑧の漕ぎ方はいずれもよく漕げることがわかる。しかし, ⑤と⑥, ⑦と⑧を比較すると, ⑦と⑧の漕ぎの方がより短時間に大きく漕げることがわかる。

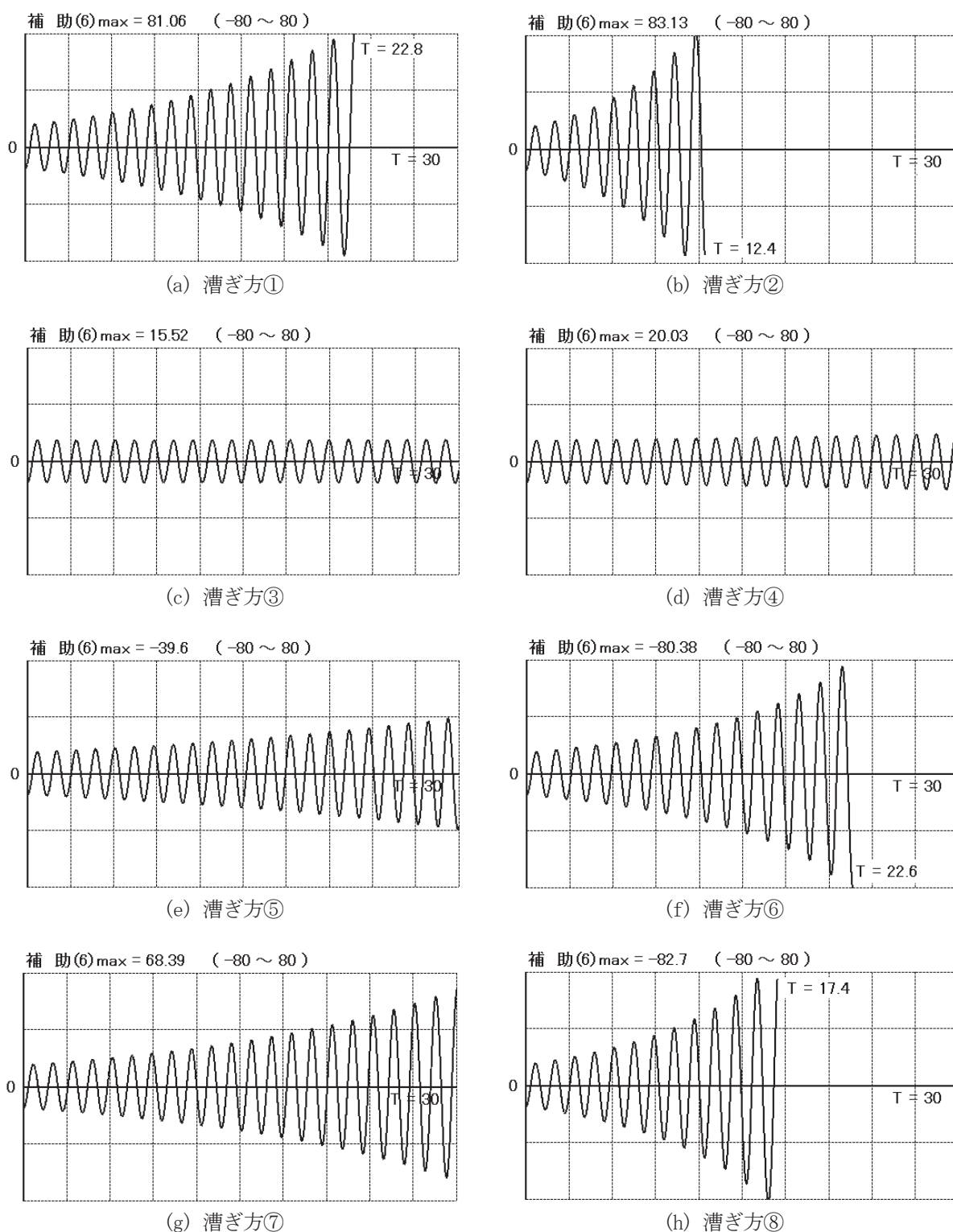


図5 ぶらんこの漕ぎ方の違いによる振り上がり角度の比較

- 注1) 補助変数(6) : 解析変数  $\theta$  (ぶらんこの振り上がり角度 [deg])  
 シミュレーション時間は、いずれも30秒間のものである。
- 注2) 漕ぎ方①, ②, ⑥, ⑧においては、振り上がり角度が80度を超えたところでシミュレーションをストップした。
- 注3) ぶらんこの漕ぎ方①~⑧は、それぞれ図3に対応している。

### 4. 3 開発した簡易ぶらんこを用いた実験

前節で示したシミュレーション結果により、簡易ぶらんこは、漕ぎ方①か②の漕ぎ方か、⑦か⑧の漕ぎ方がいいことがわかった。

漕ぎ方①と②の場合、式(2)に示したようにぶらんこを2倍の $\omega$ で漕ぐ必要がある。一般のぶらんこを漕ぐのと違って、簡易ぶらんこにおいてはおもりの上下移動をかなり早く行う必要があり、上下移動のタイミングも難しいものと思われる。実際、漕ぎ方①と②の方法で漕ぐことを試みたが、なかなか思うように漕げるものではなかった。

漕ぎ方⑦と⑧の場合、式(4)に示したように、ぶらんこを $\omega$ の半分で漕げばよい。漕ぎ方①と②の場合に比べて、かなりゆっくり漕ぐことができ、簡易ぶらんこにおいては理想的な漕ぎ方と思える。

本研究では、シミュレーションの漕ぎ方に近い状態でゆっくり漕ぐ（慌てず正しく漕ぐ）ことができる、漕ぎ方⑦と⑧の方法でぶらんこを漕ぐことを試みた。

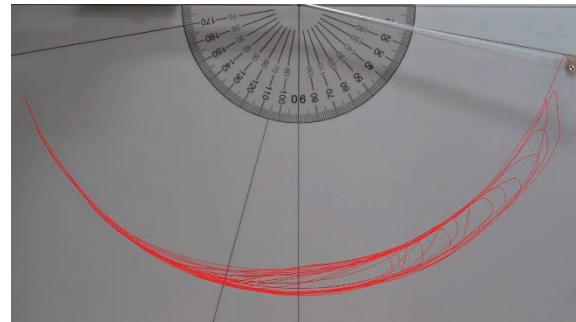
図6に、簡易ぶらんこの実験装置を示す。実験はシミュレーションと同じように $\theta = -15$ 度からスタートし、ぶらんこの振り上がり角度が80度になるまで行った。

図7に、簡易ぶらんこを漕いだときのおもりの軌跡を示す。(a)に漕ぎ方⑦の場合、(b)に漕ぎ方⑧の場合を示す。ぶらんこの動きに合わせて人の手でおもりの上下運動を行うことから、理想の軌跡ではないものの、本実験が漕ぎ方⑦と漕ぎ方⑧の方法でほぼ行われたことがわかる。なお、本図はフォーム分析ソフト「Kinovea」(無料)<sup>10)</sup>を用いて描いた。

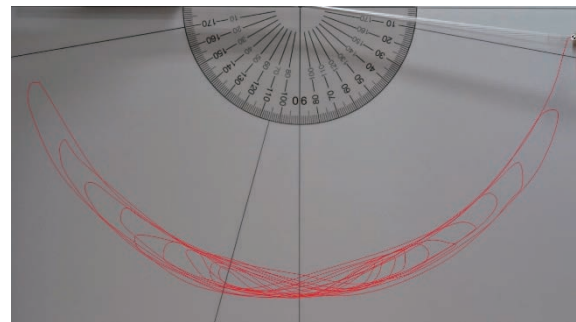
表1に、ぶらんこの振り上がり角度が80度になるまでに要した時間のシミュレーション結果と実験結果の比較を示す。実験結果はかなりのばらつきはあるものの、シミュレーション結果に近い値であるこ



図6 簡易ぶらんこの実験装置



(a) 漕ぎ方⑦の場合



(b) 漕ぎ方⑧の場合

図7 簡易ぶらんこのおもりの軌跡

表1 シミュレーション結果と実験結果の比較

Type	Time (sec)	
⑦	Sim.	34.4
	Exp.	28~35
⑧	Sim.	17.4
	Exp.	15~20

とがわかる。ただし、先にも述べたように本シミュレーション結果は振動減衰の影響を考慮していないことから、本来であればもう少し時間がかかるものと思われるが、この点は無視する。

次に、実験結果のばらつきについて考察する。図8に、ぶらんこのひもを引く速さの違いのイメージ図を示す。(a)に漕ぎ方⑦の場合、(b)に漕ぎ方⑧の場合を示す。図中の $\alpha\omega/0.5\omega$ は、ぶらんこの漕ぎ方⑦と⑧の場合のひもを引く速さを表しており、この値が1の時に理想的なひもの引っ張り方(図3に示したとおり)であり、この値が1より小さいとひもをゆっくり引っ張ったことを意味し、逆に1より大きいとひもを速く引っ張ったことを意味する。シミュレーションにおいては、式(4)中の $0.5\omega$ を例えば $0.6\omega$ としてシミュレーションすれば $(0.6\omega/0.5\omega = 1.2)$ 、理想状態よりひもを速く引っ張ったことになる。図9に、ひもを引く速さがぶらんこの振り上が

り角度が 80 度になるまでに要する時間に与える影響について示す。この結果から、ひもを理想状態よりもゆっくり引っ張ると時間は長くなり、速く引っ張ると時間は短くなるのがわかる。図 9 中に実験結果のばらつきを示したが、ひもの引っ張り方のばらつきが時間に影響を与えたことがよくわかる。

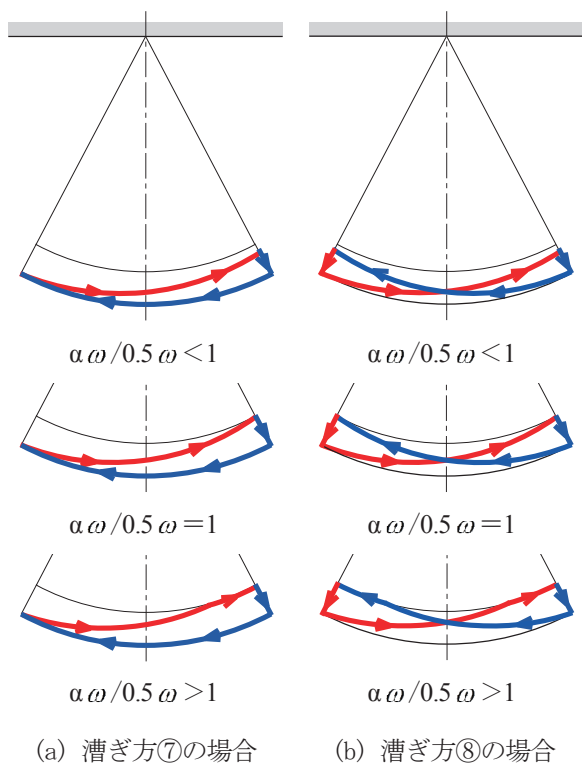


図 8 ひもを引く速さの違いのイメージ図

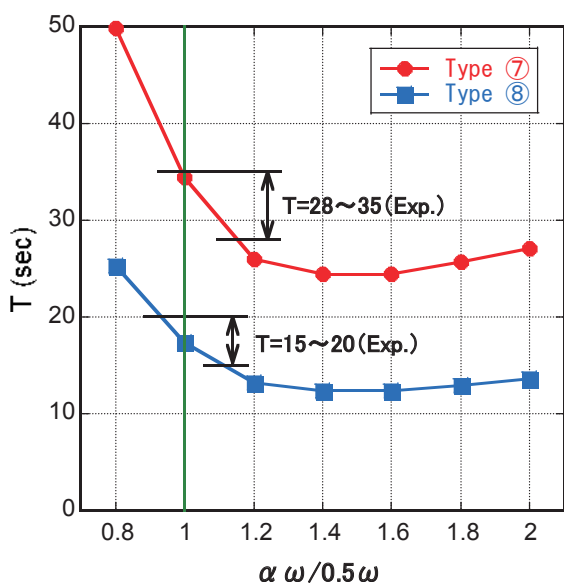


図 9 ひもを引く速さがぶらんこの振り上がり角度が 80 度になるまでに要する時間に与える影響

ひもの引っ張り方によっては (約  $0.75\omega/0.5\omega=1.5$ ), 漕ぎ方①と②に近い時間で漕ぐこともできる。

## 5. あとがき

本研究により得られた主な結論は、以下のとおりである。

- (1) 持ち運びに便利な、軽量・コンパクトな折りたたみ式簡易ぶらんこを開発した。
- (2) 開発した簡易ぶらんこに適した、ぶらんこの漕ぎ方を提案した。
- (3) 簡易ぶらんこを用いた実験結果を、シミュレーションでよく再現できた。

### 謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会平成 28 年度科学研究費補助金・基盤研究 (C) (課題番号: 26350217) の助成を受けて行われたことを付記する。

### 参考文献

- 1) 瀧口三千弘: 機械系の動力学問題学習用教材の開発, 論文集「高専教育」, 第 22 号, pp.97-105(1999)
- 2) 瀧口三千弘: 機械系の動力学問題学習用教材 (DSS) の開発—簡易アニメーション機能の追加—, 平成 24 年度工学教育研究講演会講演論文集, pp.552-553(2012)
- 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 DVD 講演論文集, J2010202(5p)(2015)
- 4) 瀧口三千弘: 教育用運動シミュレーションシステム (DSS) の開発とそれを用いた学習指導例, 平成 8 年度東レ理科教育賞受賞作品集, 第 28 回, pp.38-40(1997)
- 5) 松本幸市・瀧口三千弘: 振動現象学習用教材の開発 — 3 自由度直線振動系の場合 —, 広島商船高等専門学校紀要, 第 35 号, pp.7-12(2013)
- 6) 松本幸市・瀧口三千弘: 振動現象学習用教材の開発 — 水平方向用加振台を用いた 3 階建て構造物の場合 —, 広島商船高等専門学校紀要, 第 36 号, pp.13-18(2014)
- 7) 松本幸市・瀧口三千弘: 振動教育用加振台の開発, 平成 25 年度工学教育研究講演会講演論文集, pp.352-353(2013)
- 8) 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, 第 38 号, pp.129-133(2016)
- 9) 例えば, 國枝正春: 実用機械振動学, p5, p192, 理工学社(1988)
- 10) フォーム分析ソフト「Kinovea 0.8.15」(無料ソフト), <http://www.kinovea.org/>

付録1 簡易ぶらんこ運動解析用のDSS「MAP」プログラム

```
Option Strict On
Option Explicit On
Imports System.Drawing

Module Demo10
    *EQUATION.S *****
    ** これより下のサブプログラムの中に、あなたがシミュレーションしよう
    ** とする式等を書いて下さい。【言語: Microsoft Visual Basic 2008】
    ** 《サブプログラム》
    ** [0] 型宣言 *KATASENGEN. -----> p00
    ** [1] タイトル、イメージファイル管理名、スイッチ *TITLE. -----> p01
    ** [2] 運動方程式 *MATRIX. -----> p02
    ** (1) マトリックス要素で表した運動方程式 *MATRIX. -----> p02
    ** (2) 外力の計算式 *EXTERNAL_FORCE -----> p03
    ** (3) 入力変数の計算式 *INPUT_VARIABLE -----> p04
    ** (4) 補助変数の計算式 *ALX_VARIABLE -----> p05
    ** [3] 定数の値、解析変数の初期値
    ** (1) 定数の値 *CONSTANT_VALUE ---> p06
    ** (2) 解析変数の初期値 *INITIAL_VALUE -----> p07
    ** [4] 特殊な解析を行う場合の条件式等 *SPECIAL_ANALYSIS ---> p08
    *EQUATION.E *****
    ***** <p00>
    * [0] 型宣言
    *
    * 基本部分 (省略)
    * ユーザー変数
    Public M As Double ' おもりの質量
    Public D As Double ' 粘性減衰係数
    Public L As Double ' ぶらんこの支点からおもり重心の最上部までの長さ
    Public LG As Double ' おもりの重心の上下変位量
    Public OMEGA As Double ' 振動系の固有円振動数 (L+LG時)
    ***** <p01>
    * [1] タイトル、イメージファイル名、スイッチ
    Sub TITLE()
    * [タイトル]
    Dim Today_Renamed As String
    Today_Renamed = CStr(Today)
    Today_Renamed = Split(Today_Renamed, "/")(0) & "年" & _
    Split(Today_Renamed, "/")(1) & "月" & _
    Split(Today_Renamed, "/")(2) & "日"
    TL(0) = "***** (2016)年 (11)月 *****"
    TL(1) = Space(32) & "解析日: " & Today_Renamed
    TL(2) = "運動解析プログラム 《MAP》"
    TL(3) = " (メモ: ぶらんこの挙動) "
    TL(4) = " 解析変数の数 = 1 "
    TL(5) = " 入力変数の数 = ( 1 ) "
    TL(6) = " 補助変数の数 = 6 "
    TL(7) = " "
    TL(8) = " ***** "
    *
    * 【イメージファイル管理名】
    *
    * -----
    * IMAGE_FILE = "Buranko" ' <----- イメージファイル管理名
    * -----
    *
    * 【スイッチ】
    *
    * -----
    SW_AAA = 1 ' <----- 入力変数スイッチ (0 か 1)
    SW_BBB = 1 ' <----- 特殊解析スイッチ (0 か 1)
    *
    * -----
    End Sub
    Public Sub MATRIX()
    ***** <p02>
    * [2]-(1) 運動方程式
    *
    * ・ 運動方程式を、次のようなマトリックス要素で表して下さい。
    *
    * | A(1,1) | | DDX1 | = | A(1,2) |
    *
    * ・ 解析変数には、次の変数名を使って下さい。
    * (角) 加速度: DDX1
    * (角) 速度: DX1
    * (角) 変位: X1
    *
    * ・ 入力変数がある場合には、次の変数名を使って下さい。
    * (角) 加速度: DDY1, DDY2
    * (角) 速度: DY1, DY2
    * (角) 変位: Y1, Y2
    *
    * ・ Q1 は、外力項です。
    *
    * 【運動方程式】
    *
    * -----
    A(1, 1) = M*Y1^2
    A(1, 2) = Q1-2*M*Y1*DY1*DX1-M*G*Y1*Math.Sin(X1)-D*Y1*DX1
    *
    * -----
    End Sub
    Public Sub INPUT_VARIABLE()
    ***** <p04>
    * [2]-(3) 入力変数の計算式
    *
    * DDY1, DDY2 : (角) 加速度 (m/s^2), (rad/s^2)
    * DY1, DY2 : (角) 速度 (m/s), (rad/s)
    * Y1, Y2 : (角) 変位 (m), (rad)
    *
    * 【入力変数】
    Dim JYOUTAI As Integer ' 解析区 I D
    Static Dim TT As Double
    Static Dim A As Double
    *
    * Oクリアー
    If T = 0 Then
    TT = 0
    A = 0
    End If

```

```
End If
: ----- 第1入力変数 ----- (重心移動)
:
: <状態> ①上 ②中央 ③下
:
: 左上※ →中央 →右上 →中央 →左上※ (繰返し)
:
: JYOUTAI = 1 ' ② ③ ② ① ② ③ ② ① ②
: JYOUTAI = 2 ' ② ③ ② ① ② ③ ② ① ②
: JYOUTAI = 3 ' ① ② ③ ① ② ③ ① ② ③
: JYOUTAI = 4 ' ① ② ③ ① ② ③ ① ② ③
: JYOUTAI = 5 ' ①② ③ ① ② ③ ① ② ③
: JYOUTAI = 6 ' ①③ ② ①② ③ ①② ③ ①② ③
: JYOUTAI = 7 ' ① ② ③ ①② ③ ①② ③ ①② ③
: JYOUTAI = 8 ' ①② ③ ①② ③ ①② ③ ①② ③
: JYOUTAI = 9 ' できるだけに滑く
:
Select Case JYOUTAI
Case 1
If A=0 Then TT=T-TT Else TT=TT
If X1<0 And DX1>=0 Then
If A=4 And DX1>= 0 Then TT=T Else TT=TT
A=1
DDY1 = 0
DY1 = CSng(2*OMEGA*(LG/2)*Math.Cos(2*OMEGA*(T-TT)))
Y1 = CSng(L+LG/2+(LG/2)*Math.Sin(2*OMEGA*(T-TT)))
End If
If X1>0 And DX1>0 Then
A=2
DDY1 = 0
DY1 = CSng(2*OMEGA*(LG/2)*Math.Cos(2*OMEGA*(T-TT)))
Y1 = CSng(L+LG/2+(LG/2)*Math.Sin(2*OMEGA*(T-TT)))
End If
If X1>0 And DX1<0 Then
A=3
DDY1 = 0
DY1 = 0
Y1 = L+LG/2
End If
If X1<0 And DX1<0 Then
A=4
DDY1 = 0
DY1 = 0
Y1 = L+LG/2
End If
Case 2
If A=0 Then TT=T-TT Else TT=TT
If X1<0 And DX1>=0 Then
If A=4 And DX1>= 0 Then TT=T Else TT=TT
A=1
DDY1 = 0
DY1 = CSng(2*OMEGA*(LG/2)*Math.Cos(2*OMEGA*(T-TT)))
Y1 = CSng(L+G/2+(L/2)*Math.Sin(2*OMEGA*(T-TT)))
End If
If X1>0 And DX1>0 Then
A=2
DDY1 = 0
DY1 = CSng(2*OMEGA*(LG/2)*Math.Cos(2*OMEGA*(T-TT)))
Y1 = CSng(L+LG/2+(LG/2)*Math.Sin(2*OMEGA*(T-TT)))
End If
If X1>0 And DX1<0 Then
A=3
DDY1 = 0
DY1 = 0
Y1 = L
End If
If X1<0 And DX1<0 Then
A=4
DDY1 = 0
DY1 = 0
Y1 = L
End If
Case 3
If A=0 Then TT=T-TT Else TT=TT
If X1<0 And DX1>=0 Then
If A=4 And DX1>= 0 Then TT=T Else TT=TT
A=1
DDY1 = 0
DY1 = CSng(OMEGA*LG*Math.Cos(OMEGA*(T-TT)))
Y1 = CSng(L+LG*Math.Sin(OMEGA*(T-TT)))
End If
If X1>0 And DX1>0 Then
A=2
DDY1 = 0
DY1 = CSng(OMEGA*LG*Math.Cos(OMEGA*(T-TT)))
Y1 = CSng(L+LG*Math.Sin(OMEGA*(T-TT)))
End If
If X1>0 And DX1<0 Then
A=3
DDY1 = 0
DY1 = 0
Y1 = L
End If
If X1<0 And DX1<0 Then
A=4
DDY1 = 0
DY1 = 0
Y1 = L
End If
Case 4
If A=0 Then TT=T-TT Else TT=TT
If X1<0 And DX1>=0 Then
If A=4 And DX1>= 0 Then TT=T Else TT=TT
A=1
DDY1 = 0
DY1 = CSng(OMEGA*LG*Math.Cos(OMEGA*(T-TT)))
Y1 = CSng(L+LG*Math.Sin(OMEGA*(T-TT)))
End If
If X1>0 And DX1>0 Then
A=2
DDY1 = 0
DY1 = CSng(OMEGA*LG*Math.Cos(OMEGA*(T-TT)))
Y1 = CSng(L+LG*Math.Sin(OMEGA*(T-TT)))
End If
End If

```



付録1 簡易ぶらんこ運動解析用のDSS「MAP」プログラム (つづき)

```

If X1>0 And DX1<0 Then
  A=3
  DDY1 = 0
  DY1 = Math.Abs(CSng(OMEGA*LG*Math.Cos(OMEGA*(T-TT))))
  Y1 = CSng(L+LG*Math.Abs(Math.Sin(OMEGA*(T-TT))))
End If
If X1<0 And DX1<0 Then
  A=4
  DDY1 = 0
  DY1 = -CSng(OMEGA*LG*Math.Cos(OMEGA*(T-TT)))
  Y1 = CSng(L+LG*Math.Abs(Math.Sin(OMEGA*(T-TT))))
End If

Case 5
If A=0 Then TT=T-TT Else TT=TT
If X1<0 And DX1>=0 Then
  If A=4 And DX1>= 0 Then TT=T Else TT=TT
  A=1
  DDY1 = 0
  DY1 = 0
  Y1 = L+LG
End If
If X1>0 And DX1>0 Then
  A=2
  DDY1 = 0
  DY1 = CSng(OMEGA*LG*Math.Cos(OMEGA*(T-TT)))
  Y1 = CSng(L+LG*Math.Sin(OMEGA*(T-TT)))
End If
If X1>0 And DX1<0 Then
  A=3
  DDY1 = 0
  DY1 = 0
  Y1 = L
End If
If X1<0 And DX1<0 Then
  A=4
  DDY1 = 0
  DY1 = 0
  Y1 = L
End If

Case 6
If A=0 Then TT=T-TT Else TT=TT
If X1<0 And DX1>=0 Then
  If A=4 And DX1>= 0 Then TT=T Else TT=TT
  A=1
  DDY1 = 0
  DY1 = 0
  Y1 = L+LG
End If
If X1>0 And DX1>0 Then
  A=2
  DDY1 = 0
  DY1 = CSng(OMEGA*LG*Math.Cos(OMEGA*(T-TT)))
  Y1 = CSng(L+LG*Math.Sin(OMEGA*(T-TT)))
End If
If X1>0 And DX1<0 Then
  A=3
  DDY1 = 0
  DY1 = 0
  Y1 = L+LG
End If
If X1<0 And DX1<0 Then
  A=4
  DDY1 = 0
  DY1 = -CSng(OMEGA*LG*Math.Cos(OMEGA*(T-TT)))
  Y1 = CSng(L+LG*Math.Abs(Math.Sin(OMEGA*(T-TT))))
End If

Case 7
If A=0 Then TT=T-TT Else TT=TT
If X1<0 And DX1>=0 Then
  If A=4 And DX1>= 0 Then TT=T Else TT=TT
  A=1
  DDY1 = 0
  DY1 = -CSng(0.5*OMEGA*LG*Math.Sin(0.5*OMEGA*(T-TT)))
  Y1 = CSng(L+LG*Math.Cos(0.5*OMEGA*(T-TT)))
End If
If X1>0 And DX1<0 Then
  A=2
  DDY1 = 0
  DY1 = CSng(0.5*OMEGA*LG*Math.Sin(0.5*OMEGA*(T-TT)))
  Y1 = -CSng(L+LG*Math.Cos(0.5*OMEGA*(T-TT)))
End If
If X1>0 And DX1>0 Then
  A=3
  DDY1 = 0
  DY1 = -CSng(0.5*OMEGA*LG*Math.Sin(0.5*OMEGA*(T-TT)))
  Y1 = CSng(L+LG*Math.Cos(0.5*OMEGA*(T-TT)))
End If
If X1<0 And DX1<0 Then
  A=4
  DDY1 = 0
  DY1 = CSng(0.5*OMEGA*LG*Math.Sin(0.5*OMEGA*(T-TT)))
  Y1 = -CSng(L+LG*Math.Cos(0.5*OMEGA*(T-TT)))
End If

Case 8
If A=0 Then TT=T-TT Else TT=TT
If X1<0 And DX1>=0 Then
  If A=4 And DX1>= 0 Then TT=T Else TT=TT
  A=1
  DDY1 = 0
  DY1 = -CSng(0.5*OMEGA*LG*Math.Sin(0.5*OMEGA*(T-TT)))
  Y1 = CSng(L+LG*Math.Cos(0.5*OMEGA*(T-TT)))
End If
If X1>0 And DX1>0 Then
  A=2
  DDY1 = 0
  DY1 = -CSng(0.5*OMEGA*LG*Math.Sin(0.5*OMEGA*(T-TT)))
  Y1 = CSng(L+LG*Math.Cos(0.5*OMEGA*(T-TT)))
End If
If X1>0 And DX1<0 Then
  A=3
  DDY1 = 0
  DY1 = -CSng(0.5*OMEGA*LG*Math.Sin(0.5*OMEGA*(T-TT)))
  Y1 = CSng(L+LG*Math.Cos(0.5*OMEGA*(T-TT)))
End If
If X1<0 And DX1<0 Then
  A=4
  DDY1 = 0
  DY1 = CSng(0.5*OMEGA*LG*Math.Sin(0.5*OMEGA*(T-TT)))
  Y1 = -CSng(L+LG*Math.Cos(0.5*OMEGA*(T-TT)))
End If

End If
If X1<0 And DX1<0 Then
  A=4
  DDY1 = 0
  DY1 = -CSng(0.5*OMEGA*LG*Math.Sin(0.5*OMEGA*(T-TT)))
  Y1 = CSng(L+LG*Math.Cos(0.5*OMEGA*(T-TT)))
End If

Case 9
DDY1 = 0
DY1 = CSng(1.5*OMEGA*(LG/2)*Math.Cos(1.5*OMEGA*T))
Y1 = CSng(L+LG/2+(LG/2)*Math.Sin(1.5*OMEGA*T))

End Select
; ----- 第2入力変数 -----
DDY2 = 0
DY2 = 0
Y2 = 0
;-----
** INPUT_VARIABLE End **
End Sub

Public Sub AUX_VARIABLE()
;***** <p05>
; * [2]-(4) 補助変数の計算式
; * 【補助変数】
; * -----
S1 = DY1 ' 入力変数 (重心の上下速度) (m/s)
S2 = Y1 ' 入力変数 (重心の上下変位) (m)
S3 = -Y1 ' # (m)
S4 = L ' ぶらんこの支点からおもり重心の最上部までの長さ (m)
S5 = OMEGA ' 振動系の固有円振動数 (L+LG時) (rad/s)
S6 = X1 * RDC ' ぶらんこの振り上がり角度 (deg)
; * -----
End Sub

;***** <p06>
; * [3]-(1) 定数値
; *
Public Sub CONSTANT_VALUE()
; * 【定数値】 (単位、メモ)
; * ----- 自動設定用定数 -----
T_END = 30 ' [sec] シミュレーション時間
T_DELTA = 0.01 ' [sec] 時刻幅 (但し T_DELTA<=T_END/200)
; * ----- 一般定数 -----
G = 9.8 ' [m/s^2]
PAI = Math.PI ' 円周率
DRC = PAI / 180 ' DEG --> RAD この値をかき入れよ
RDC = 180 / PAI ' RAD --> DEG この値をかき入れよ
; * ----- 質 量 -----
M = 0.04605 ' [kg]
; * ----- 粘性減衰係数 -----
D = 0 ' [N-m-s/rad] (回転減衰)
; * ----- 寸 法 -----
L = 0.425 ' [m] ぶらんこの支点からおもり重心の最上部までの長さ
LG = 0.037 ' [m] おもりの重心の上下変位量 LG=0.037(実験装置)
; * ----- その他 -----
OMEGA = CSng(Math.Sqrt(G/(L+LG))) ' [rad/s] 固有円振動数 (L+LG時)
; * -----
End Sub

Public Sub INITIAL_VALUE()
;***** <p07>
; * [3]-(2) 解析変数の初期値
; * 【初期値】
; * (角) 加速度 (角) 速度 (角) 変位
; * (m/s^2) (m/s) (m)
; * (rad/s^2) (rad/s) (rad)
; * -----
DDX1 = 0
DX1 = 0
X1 = -15*DRC
; * -----
End Sub

;***** <p08>
; * [4] 特殊な解析を行う場合の条件式等
; * 【特殊解析】
Sub SPECIAL_ANALYSIS()
; * -----
If Math.Abs(X1*RDC)>=83 Then 'ぶらんこの振り上がり角度が80度を
T = T_END * 2 ' 超えたらシミュレーションを終わる。
Return
End If
; * -----
End Sub
End Module

```

(注)  
<p03>については、記述箇所がないので省略した。