



レジ袋で弁当箱を持ち運ぶと弁当箱が傾く原因

赤澤, 篤彦

(Citation)

課題研究優秀論文集, 2023:1-74

(Issue Date)

2024-01

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/0100485446>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100485446>



2023 年度 卒業研究最終論文

レジ袋で弁当箱を持ち運ぶと 弁当箱が傾く原因

神戸大学附属中等教育学校 10 回生

6 年 2 組 1 番

赤澤 篤彦

(指導教員 竹村 実成)

2023 年度 卒業研究最終論文
レジ袋で弁当箱を持ち運ぶと弁当箱が傾く原因
神戸大学附属中等教育学校 10 回生 6 年 2 組 1 番 赤澤 篤彦
(指導教員 竹村 実成)

要旨

本研究の目的は、「レジ袋で荷物を持ち運ぶと中身が傾く現象」の原因を明らかにすることである。現象の理解のため、ストロボ撮影による分析と運動方程式によるシミュレーションを並行して実施した。結果として、運動は、水平方向の並進運動、鉛直方向の単振動、肩と肘をそれぞれ中心とする振り子運動の足し合わせによって表現できることが分かった。次に、弁当箱の運動をモデル化し、弁当箱に働く力を仮定した上で弁当箱にはたらく力のモーメントについて考察した。結果から、弁当箱の回転運動には臨界角が存在し、諸条件の変化に応じて力のモーメントが変化することが示唆された。さらに、弁当箱の質量を変えつつ加速度計を利用して運動を測定し、フーリエ変換を用いて周波数領域における変化を分析した。その結果、振幅と質量の相関関係・重力と慣性力の大小関係があることや質的に異なる 2 種類の運動に分類できることが見いだされた。結論として、腕を規則的に動かすために小刻みに腕に力を加えている効果や肘の可動域の端に達したときに慣性力が大きくなる効果の影響が大きいこと、そして弁当箱に臨界角が存在し臨界角を超えると弁当箱が傾くことが分かった。今後は本研究をもとに解決策を考案し、考案した解決策が本当に軽減効果を有しているのか検証実験を行う予定である。

レジ袋で弁当箱を持ち運ぶと弁当箱が傾く原因

Causes of Lunch Boxes Tilting when Carrying in a Plastic Bag

赤澤篤彦

Atsuhiko Akazawa

Abstract

Previous research about movement when carrying a lunch box in a plastic bag has not been fully examined, and its causes remain largely unknown. This paper aims to investigate the causes of this phenomenon. Analysis by stroboscopic photography and simulation using Newton's equation of motion was performed to better understand the movement. The results showed that the movement can be described by the addition of horizontal translational motion, vertical simple harmonic motion, and pendulum motion at shoulder and elbow. Next, the motion was measured by an accelerometer while changing the mass held in the hand, and the changes in the frequency domain were analyzed using the Fourier transform. Our findings indicate it is possible to classify the movement into two qualitatively different types of motion, and that there is a correlation between amplitude and mass, and between gravity and inertia. We concluded that major causes of the phenomenon are the effect of adding force to the arm in small increments to move the arm regularly and of a larger inertial force when the end of the elbow's range of motion is reached. We plan to invent a solution and conduct experiments to check whether the solution has a reduction effect.

Keywords: Plastic bag, Discrete Fourier Transform(DFT),
Stroboscopic photography, Simulation, Newton's equation of motion

目次

要旨	1
第 1 章 序論	1
第 1 節 近年のレジ袋の利用	1
第 2 節 本研究の背景	1
第 3 節 レジ袋に対する物理的な先行研究	1
第 4 節 本研究の意義	2
第 5 節 本研究の目的	2
第 6 節 本論文の構成	2
第 2 章 レジ袋を持ち歩く際の人体の動きについて	3
第 1 節 本実験の概要	3
第 2 節 実験目的	3
第 3 節 実験方法	3
第 4 節 実験結果	3
第 5 節 考察	5
第 3 章 プログラミング(Python)を用いた分析	8
第 1 節 本実験の概要	8
第 2 節 実験目的	8
第 3 節 実験方法	8
第 4 節 実験結果	8
第 5 節 考察	10
第 4 章 力学計算に基づいたシミュレーション分析	11
第 1 節 本実験の概要	11
第 2 節 実験目的	11
第 3 節 実験方法	11
第 4 節 実験結果	11
第 5 節 考察	11
第 5 章 レジ袋を持ち歩く際の動き(加速度)の分析	17
第 1 節 本実験の概要	17
第 2 節 実験目的	17
第 3 節 実験方法	17
第 4 節 実験結果	17
第 5 節 考察	23
第 6 章 結論	56
第 1 節 まとめ	56
第 2 節 今後の展望・課題	56
謝辞	57
付録 A ストロボ撮影で得られた画像	58
付録 B 第 3 章におけるプログラミングコード	62
付録 C 力学計算に基づいたシミュレーション分析の詳細	64

付録 D 予備実験の結果	67
参考文献	69

第 1 章 序論

第 1 節 近年のレジ袋の利用

近年ではレジ袋が生活の中で欠かせないものとなっている。レジ袋の有料化やマイバッグの普及などによりレジ袋の使用の削減が叫ばれる中でも、環境省環境再生・資源循環局が実施した「令和 2 年 11 月レジ袋使用状況に関する WEB 調査」によると、1 週間の間に 28.1% の人が依然としてレジ袋を 1 回以上利用している[1]。また、近年普及しつつあるマイバッグ・エコバッグについても底板が存在しないものについては、第 3 節で後述するが、レジ袋と同様の性質を持つと言える。これらのことから、レジ袋やそれに類似するものが日常生活の多くの場面で用いられており、それらに対する研究が重要である。

第 2 節 本研究の背景

ある日、弁当屋で弁当を購入してレジ袋に入れた状態で家へ持ち帰った。家まで 20 分ほど歩いて持ち帰り、帰宅してレジ袋の中身を確認した。レジ袋の中では、購入した弁当箱は大きく傾き、弁当の中身は一方に偏ってしまっていた。後日、再び弁当屋で弁当を購入する機会があったので、今度は中の弁当が傾かないように気を配り慎重に持ち帰った。しかし、帰宅してレジ袋の中を確認すると、レジ袋の中は前回と同じように弁当は傾き、中身も一方に偏ってしまっていた。この状況は、自分以外の家族でも同様であったので、万人に共通する物理的な問題があるに違いないと考えた。そこで、レジ袋の中身が傾くのは何が原因なのかという問いを立て、原因を特定することによってレジ袋の中身が傾くという問題の解決に貢献できると考えた。

第 3 節 レジ袋に対する物理的な先行研究

レジ袋の環境的側面についての研究は数多存在し、分野の一つとして確立されているが、レジ袋を物理的な側面で研究することについては、あまりなされていないことが分かった。

レジ袋の中身が傾いてしまう現象についての先行研究として、「ビニール袋で弁当箱を傾かせずに持ち歩く方法」[2]という論文がある。この論文の著者である横田新吾は、「弁当箱の下に 2 冊の本を横に並べて置くという方法」[2]が有効であるとしている。一方で、横田新吾は、「一般にどのような条件を満たせば良いのか、まだ明確ではない。社会に広く普及する解決策はさらによく考察実験して見つける必要がある。」[2]とも記述している。

このように、そもそもレジ袋や底なしのマイバッグなどを力学的な研究題材として扱っている論文はほとんどないに等しいと考える。筆者も Google により運営されている Google Scholar というサービスで検索を様々な表現から検索したが、それらしき論文は見当たらなかった。また、第 3 節の先行研究は一般の Google 検索により発見した論文であるが、この論文を引用したとみられる論文も見当たらなかった。これらのことから、本研究が扱う問いは分野としてそもそも未開拓であり、本格的な研究が行われること自体がいまだ行わ

れてきていなかったと推察される。そのため、自分自身がレジ袋の中身を傾く原因を特定することを通じてレジ袋の中身が傾かずに済む条件を示したり、傾かせずに持ち歩く方法を提示したりしたいと考えた。

第4節 本研究の意義

本研究の意義は、レジ袋の中身が傾く原因を特定することを通じて、レジ袋を利用する多くの人々が家までレジ袋の中身を無事に持ち帰ることができるようになることである。レジ袋の中身を傾く原因を見つけることを通じて多くの人々の生活水準を向上させることができる。また、本研究は第3節で示したようにレジ袋や底板なしのマイバッグ・エコバッグに関わる物理学の基礎的な研究であり、その領域のみならず、物理に対する関心を活性化させるという学術的・教育学的な意義もある。

第5節 本研究の目的

レジ袋の中身が傾く原因を特定することで、レジ袋の中身が傾いてしまう問題の解決の糸口とすること。

第6節 本論文の構成

本研究における問いは、なぜレジ袋を持ち運ぶと中身が傾くのか、である。

まず、研究題材について深く知るために第2章でストロボ撮影とその分析によってレジ袋を持ち歩く際の人体の動きがどのようなものであるか調査した。

その後、第3章ではPythonというプログラミング言語を用いて単振り子運動におけるおもりに対する加速度がどのようなものであるか、どのように変化するかについて水平成分と鉛直成分で分けて考察した。

次に第4章では、力のモーメントや力学的エネルギーに関する側面から事象についての考察を行い、弁当箱の挙動についての分析を行った。

また第5章では、質量のあるものを持ち歩く際の手元の動きについて、質量や被験者などの条件を変えながら加速度計を用いて実際に計測した。このデータを分析することにより、何が原因となってレジ袋によってもものを持ち運ぶ際に中身が傾くのかについて第2章や第3章で得られたことを交えて考察を行った。

最後に第6章では、結論と題して問いに対する結論や本研究の今後の展望について記述した。

第2章 レジ袋を持ち歩く際の人体の動きについて

第1節 本実験の概要

本研究を進めるにあたって、レジ袋を持ち歩く際の人体の動きをストロボ撮影とその分析により確認した。

第2節 実験目的

ストロボ撮影を通じてレジ袋を持ち歩く際の手元やひじ、肩などの動きをそれぞれ観察する。レジ袋を持ち歩く際の動きそのものを確認・記録することで、持ち歩く動きが根底に持つ課題を見つける。

第3節 実験方法

- (1) ストロボスコープ、デジタルカメラを三脚(カメラ用、ストロボ用、計2本)に取り付け、撮影したい場所から5mほど離れたところに設置した。
- (2) デジタルカメラをマニュアルモードに設定する。また、露光時間を5秒に設定した。
- (3) ストロボスコープの発光回数を30Hz(周期: 0.033秒)に設定した。
- (4) 被撮影者が歩く2mの背景にプラスチック段ボール(黒)を配置する(図1)。



[図1] 撮影場所の様子

- (5) 体の左肩、腰の左側面、左腕のひじ、左手首にそれぞれ別の色の反射材を貼りつけた。これは、分析する際に部位ごとに考察しやすくするために行った。
- (6) ストロボ撮影する部屋を消灯し、カーテンを閉めて完全に光が部屋に入らないようにした。
- (7) デジタルカメラで撮影を行い、その際、被撮影者は2mの距離を歩いた。
- (8) (7)の操作を計7回行った。
- (9) ストロボ撮影で得られた画像から分析を行い、レジ袋を持って移動しているときの手元の動きに大きな影響を及ぼす要因を考察した。

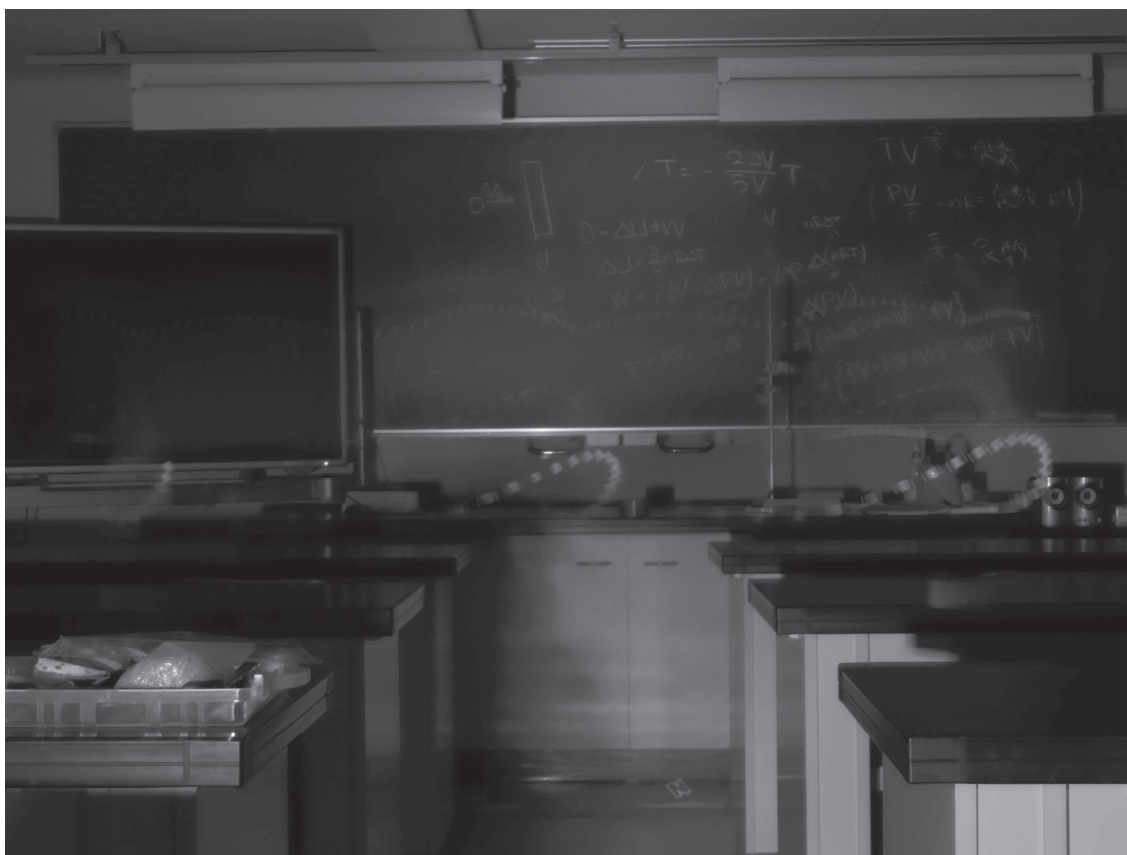
第4節 実験結果

第1項 ストロボ撮影で得られた画像

ストロボ撮影で得られた画像の中から一部を以下に添付する(図2)。このほかのストロ

ボで得られた画像に関しては、付録 A を参照すること。

以下のいずれのストロボ写真についても、画像の右側から左側へ歩行している。



[図 2] ストロボ撮影の 1 枚目の写真

第 2 項 第 1 項の画像を見やすく白黒反転させた画像

第 1 項では視覚的にわかりにくいため、ストロボ撮影によって得られた画像の中で反射材の動きが読み取りやすいと考えた画像を抽出し、それらの色を白黒反転させた(図 3, 図 4)。



[図 3] ストロボ撮影の 7 枚目を白黒反転させた写真

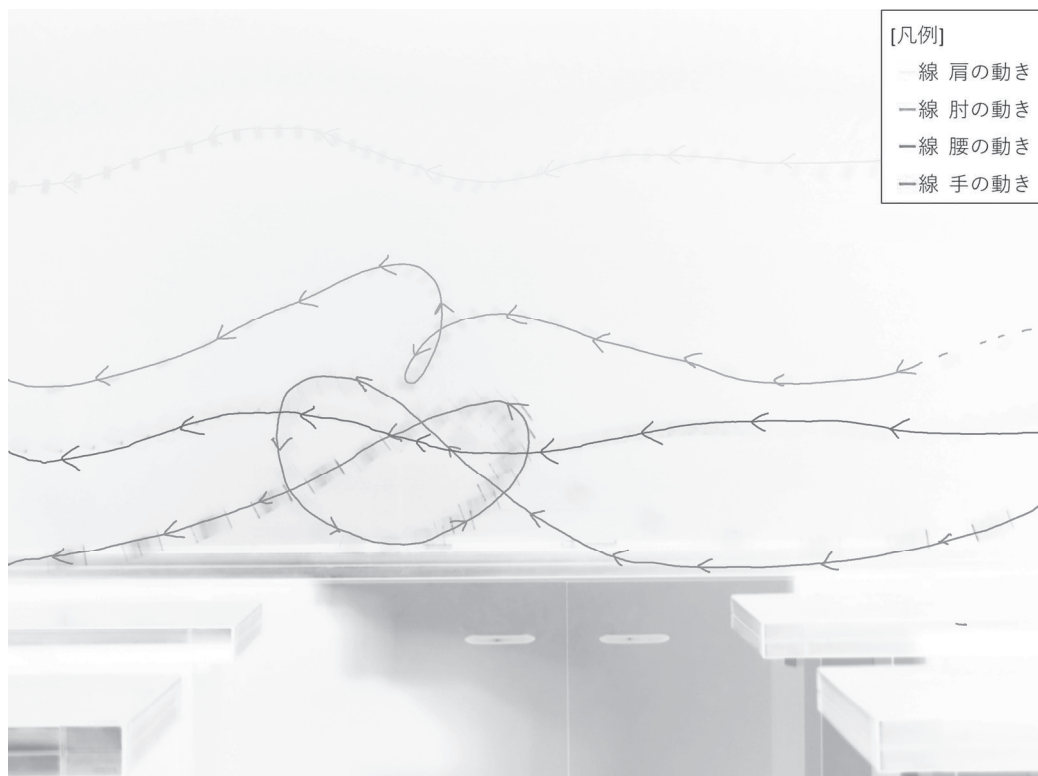


[図 4] ストロボ撮影の 8 枚目を白黒反転させた写真

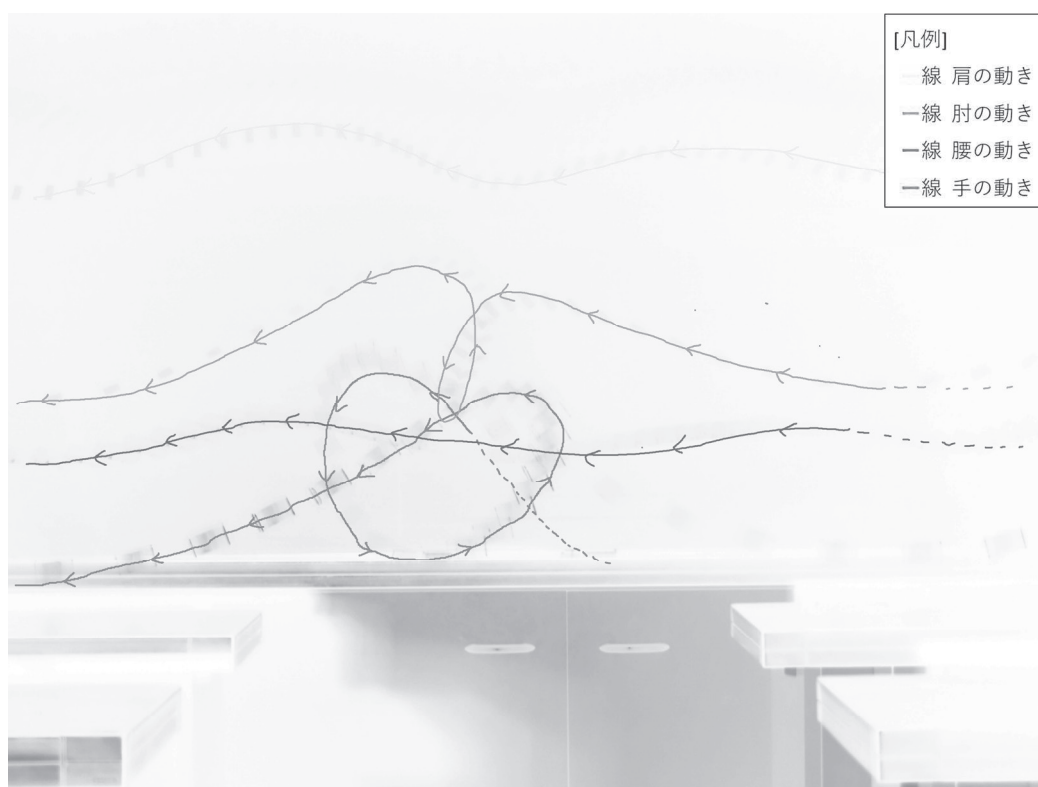
第 5 節 考察

第 4 節第 2 項で得られた白黒反転させた画像をさらに編集し、物体の明らかに通った部分に実線を物体の通ったと考えられる部分に破線を引いた。また、反射材が通ったと推測

できる方向に矢印を加えた(図 5, 図 6)。



[図 5] ストロボ撮影の 7 枚目における反射材の推測軌道



[図 6] ストロボ撮影の 8 枚目における反射材の推測軌道

図 5, 図 6 において、赤線が手首付近の動き、緑線が肘の動き、黄線が肩の動き、青線が腰の動きを示している。

ストロボ撮影で得られた画像から、腰の動き(青線)を上下方向に適切に平行移動させると肩の動き(黄線)とほぼ同じような形で重なることが分かる。つまり、腰の動き(青線)と肩の動き(黄線)の変位を周期関数にとらえるとすると、周期の長さがほぼ同じであり、さらに周期関数の位相がずれていないことを示している。したがって、レジ袋を持って移動する時には、腰と肩はどちらも、水平成分にあたる移動する方向への体の等速運動と、人が歩くことに起因する鉛直成分における単振動のような小さな運動が足しあわされたような動きをするということが示唆される。

次に、肘の動き(緑線)に注目する。図 5, 図 6 のいずれの 2 つの画像においても、先述した水平成分にあたる移動する方向への体の等速運動と人が歩くことに起因するわずかな鉛直成分にあたる単振動のような運動が足しあわされたような動きに加えて、1 周期に 1 回、楕円形の輪を作るような動きがあることが分かる。ここから、肘の運動についてはこれまでの肩の動きに加えて、肩を中心とする振り子のような運動が影響を与えていることが分かる。

さらに、手首付近の動き(赤線)に注目する図 5, 図 6 のいずれの 2 つの画像においても、これまでに述べたような水平成分にあたる移動する方向への体の等速運動と人が歩くことに起因するわずかな鉛直成分にあたる単振動のような運動が足しあわされたような動きに加えて、さらに 1 周期に 1 回、ハート型の輪を作るような動きがあることが分かる。ひじの時は楕円のような形状の輪ができたが、手首付近ではハートのような形状の輪が形成されたことから、手首付近の運動についてはこれまでの肘の動きに加えて、肘を中心とする振り子のような運動が影響を与えているのではないかと考えた。

これらのことをまとめると、レジ袋を持って移動するときの手元の動きに影響を及ぼすものとして、

- (i) 水平成分にあたる移動する方向への体の等速運動
- (ii) 鉛直成分における単振動のような小さな運動
- (iii) 肩を中心とする振り子のような運動
- (iv) 肘を中心とする振り子のような運動

が特にレジ袋を持って移動する時の動きに影響を及ぼすことが示唆される。

第 3 章 プログラミング(Python)を用いた分析

第 1 節 本実験の概要

プログラミング(Python)を用いて振り子運動を再現した。再現した振り子運動の X 成分 Y 成分を抽出して振り子運動そのものに対して分析を行った。

第 2 節 実験目的

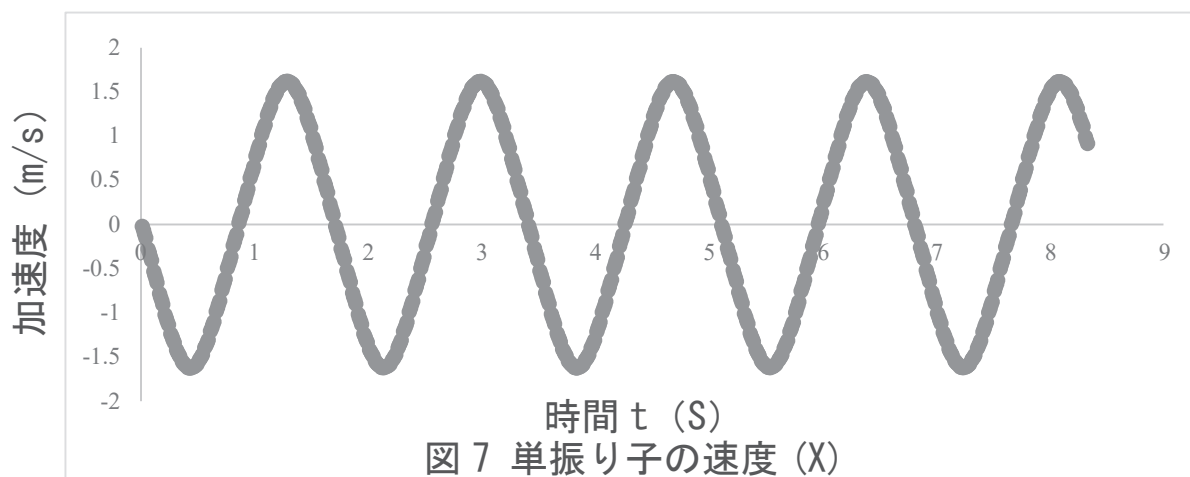
振り子運動における、おもりにはたらく慣性力がどのように働いているのかについてや、おもりにはたらく慣性力の大きさが時間の経過とともにどのように変化するのかなどについて、プログラミングを用いて再現したのち分析し、明らかにする。

第 3 節 実験方法

- (1) Python 上で振り子運動を 2 次元(x-y 平面)で描画するプログラミングを行った。最終的に打ち込んだ Python のソースコードを付録 B に示す。なお、本研究では Google Colaboratory を使用して実験を行った。また、ソースコードの作成にはインターネット上の記事を参考にしながら作成している部分がある[2]。
- (2) 再現した動きの X 成分と Y 成分のデータをそれぞれ表示させて座標のデータを取り出した。
- (3) x 成分、y 成分の単位時間当たりの変化から、表計算ソフトを用いて x,y のそれぞれの速度について求めた。
- (4) (3)で求めた速度の単位時間当たりの変化から、表計算ソフトを用いて x,y のそれぞれの加速度について求めた。
- (5) 運動方程式 $m\vec{a} = \vec{F}$ を考慮して、(3)で求めた加速度をもとにおもりにはたらく慣性力について考察した。

第 4 節 実験結果

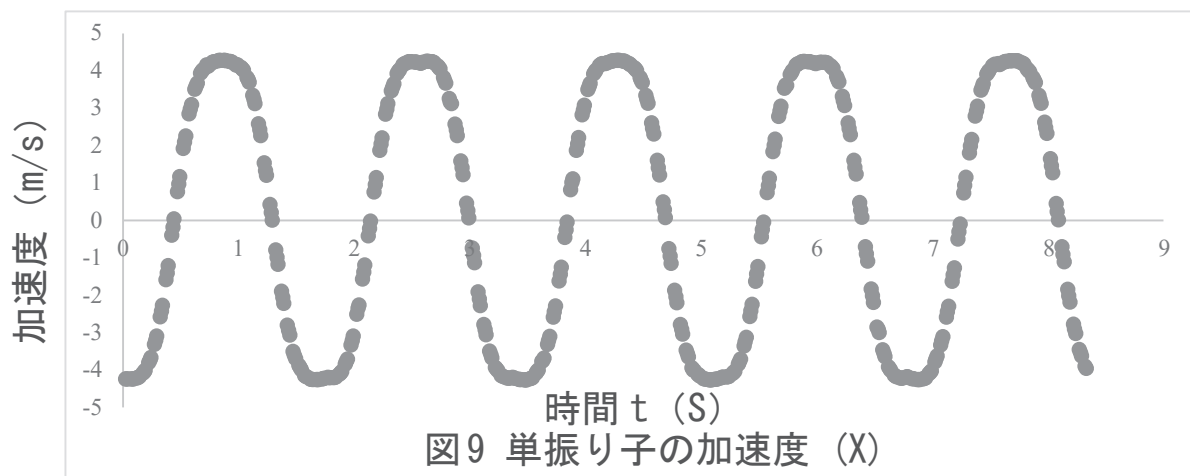
以下のグラフは、横軸に時間 t、縦軸に時刻 t における振り子運動の速度の X 成分をとったものである。このグラフは時間 t の変化に対して速度の X 成分がどのように変化するのかを表している(図 7)。



以下のグラフは、横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における振り子運動の速度の Y 成分をとったものである。このグラフは時間 t の変化に対して速度の Y 成分がどのように変化するかを表している(図 8)。

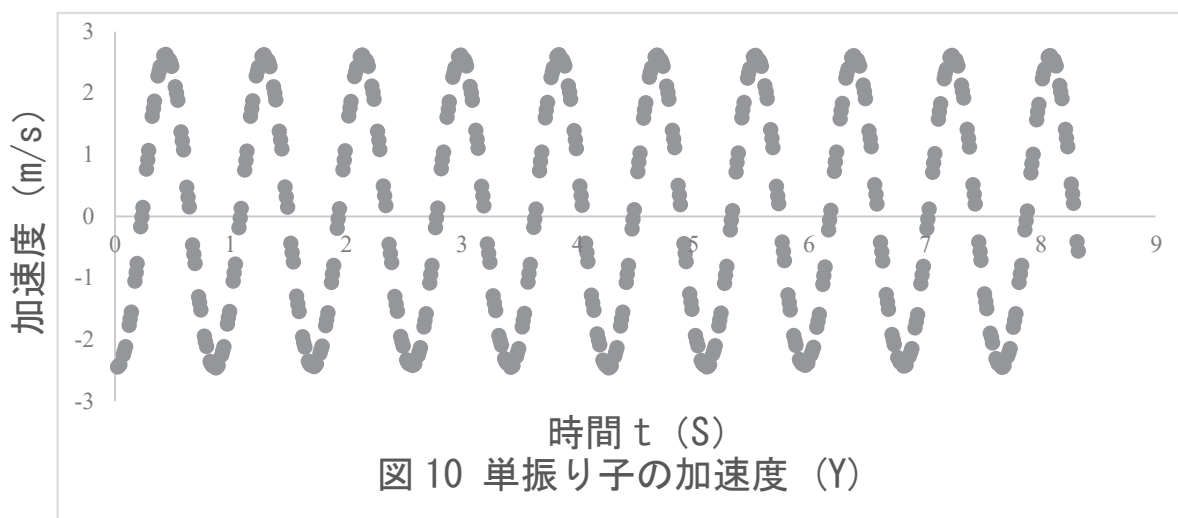


以下のグラフは、横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における振り子運動の加速度の X 成分をとったものである。このグラフは時間 t の変化に対して加速度の X 成分がどのように変化するかを表している (図 9)。

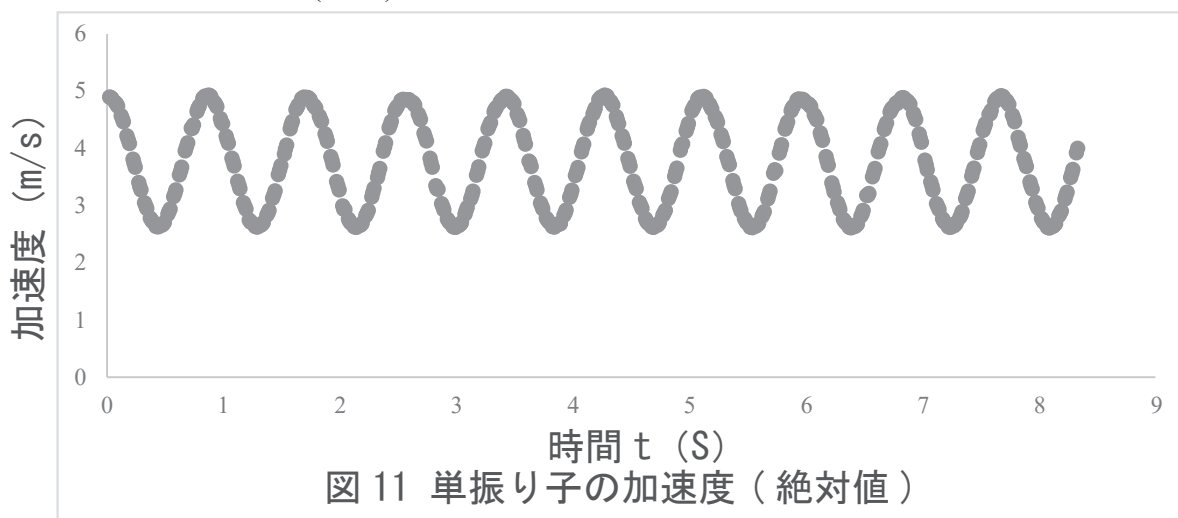


以下のグラフは、横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における振り子運動の加速度の Y 成分を

とったものである。このグラフは時間 t の変化に対して加速度の Y 成分がどのように変化するのかを表している。(図 10)



以下のグラフは、横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における振り子運動の加速度の絶対値をとったものである。このグラフは時間 t の変化に対して加速度の大きさがどのように変化するのかを表している。(図 11)



第 5 節 考察

この実験がものを持ち歩く際の手元の動きが単振り子の運動に近いという仮定の下、行われているということに留意すると、質量のあるものを手にもって持ち運ぶ運動が単振り子の運動に十分近いといえる時、ものにはたらく慣性力は水平成分においても鉛直成分においても三角関数に近い周期的な値をとることが推察される。

第4章 力学計算に基づいたシミュレーション分析

第1節 本実験の概要

力学の理論に基づいた計算を通して、弁当箱の挙動についての分析を行った。

第2節 実験目的

力のモーメントや力学的エネルギーに関する側面から事象についての考察を行い、主張の客観性を強める。

第3節 実験方法

弁当箱が若干の角度 θ で傾いてしまっている状況について考え、弁当箱にはたらく力を基に、力のモーメントについて考え、その後の弁当箱の挙動について考察する。

第4節 実験結果

弁当箱の将来の挙動を説明するために必要な要素は様々存在すると考えられる。そこで、弁当箱の挙動を説明する必要最低限の要素のみを持つような状況にモデル化して考えることにした。

モデル化した弁当箱が若干の角度 θ で傾いてしまっている状況について考え、その弁当箱にはたらく力の全てを図示した。

その後、傾いた角度 θ について、力のモーメントのパラメータ関数を python 上でプログラミングを行い、弁当箱の傾き θ と力のモーメントのグラフを作成した。その後、 θ 以外の各種パラメータを変化させたときの弁当箱にはたらく力のモーメント考えた。

第5節 考察

結果から、「理想弁当」なる新たな条件を設定した。「理想弁当」とは、

- (1) 弁当箱の辺の比は、(弁当箱の底面の比) $\geq$ (弁当箱の高さの比)である。
- (2) 弁当箱の中身は、固体ではあるものの実際は液体のような運動を行い、中身の質量は一様に分布する。
- (3) 弁当箱自体に質量はなく、弁当箱の中身にのみ質量が存在する。
- (4) 弁当箱の容量に対する弁当箱に入っている中身の体積は、充填率 c で考える。

のような条件が設定された弁当箱及びその内部の状態である。第4章のこれ以降は、弁当箱は理想弁当であると仮定して考える。

具体的な理想弁当がおかれた状況を説明する。弁当箱が角度 θ だけ傾いてしまった状況を考える。立体のままの状況では力学計算が困難であるので、設定を少し変更して以下のような平面の中で考えることにする(図12)。図12は、弁当箱が単振り子運動をして運動

している際の最下点の状況を示す。

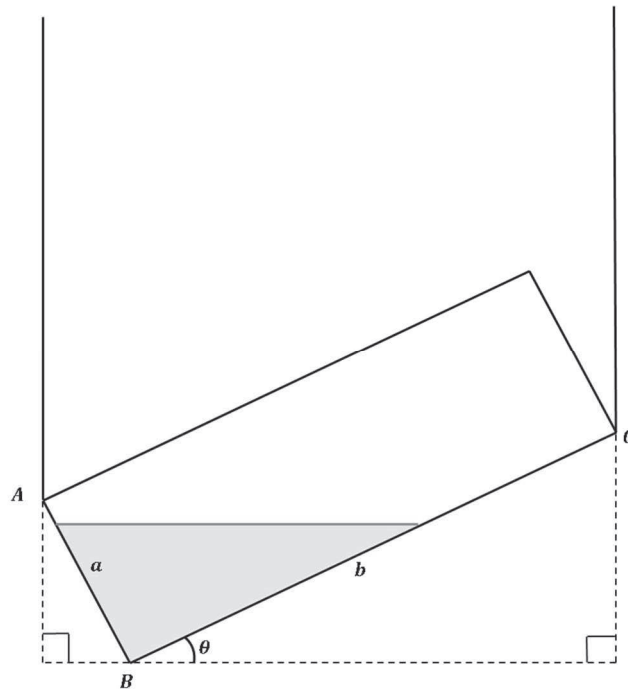


図 12 理想弁当の様子

レジ袋の側面は糸であり、糸と頂点 A・C が固定されているものとして考える。さらに、各糸に働く張力は等しく T であるものとし、糸同士は平行であると近似して考える。さらに、弁当箱は運動の最下点の位置であるものとして考えると、弁当箱にはたらく力は以下のように示すことができる(図 13)。

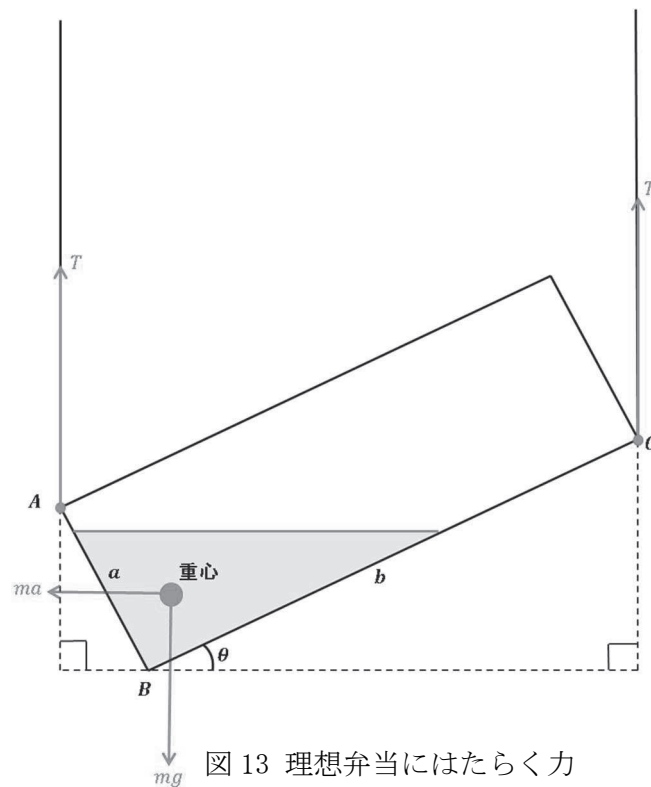


図 13 理想弁当にはたらく力

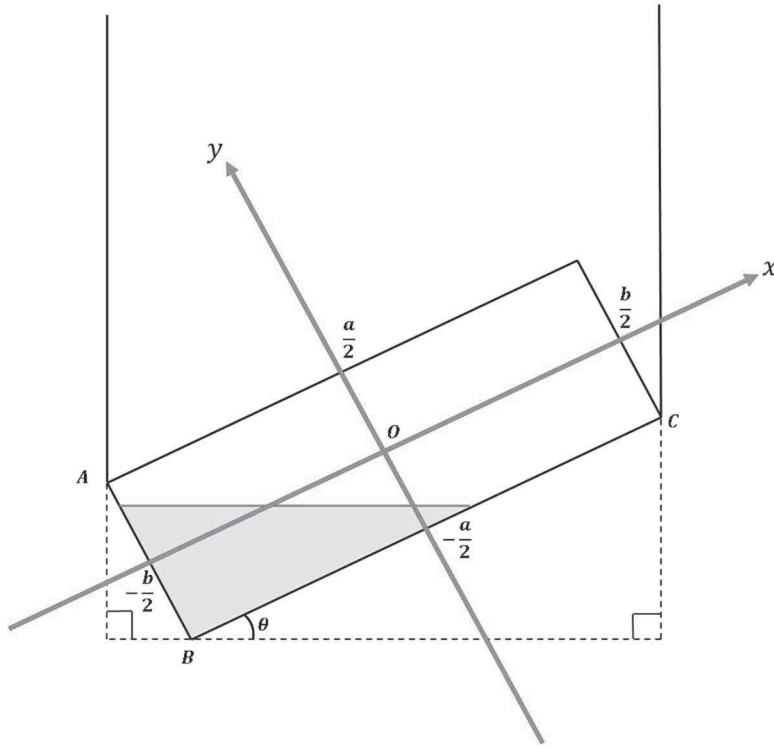


図 14 重心移動に関する座標系

ここで、弁当箱が傾くことによる理想弁当の重心の移動については、著者が理想弁当を
発案後に提出されたレポート(藤野, 2023)から

$$f(x) = \begin{cases} \frac{3bc}{a^2}x^2 - b + bc & \left(\text{if } -\frac{a}{3} < x \leq 0\right) \\ \frac{8abc}{9(x+a)} - b & \left(\text{if } \frac{4ac}{3} - a \leq x \leq -\frac{a}{3}\right) \\ -\sqrt{\frac{b^2}{3ac}}(x+a-ac) & \left(\text{if } -a+ac \leq x < \frac{4ac}{3} - a\right) \end{cases} \quad (1)$$

で表すことができることが分かっている[4]。

また、これを理想弁当の傾き θ のみで表すことも可能であり、

$$f(x) = \begin{cases} \frac{3bc}{a^2}x^2 - b + bc & (\text{if } 0 \leq \tan \theta < \tan \theta_1) \\ \frac{8abc}{9(x+a)} - b & (\text{if } \tan \theta_1 \leq \tan \theta \leq \tan \theta_2) \\ -\sqrt{\frac{b^2}{3ac}}(x+a-ac) & (\text{if } \tan \theta_2 < \tan \theta \leq \frac{\pi}{2}) \end{cases} \quad (2)$$

(ただし、 $\tan \theta_1 = \frac{2bc}{a}$, $\tan \theta_2 = \frac{b}{2ac}$ である)

で表すことができることが分かっている[4]。式(1)を図で示すと以下の通りになる(図 15)。
以下のグラフは、図 13 の平面における $a = 4$, $b = 2$, 充填率 $c = 0.4$ の理想弁当が描く重
心の軌跡を示している。なお、このグラフにおける縦軸及び横軸は上の図に示すような座標

系におけるものである(図 14)。また、特に断りがない限り、図 13 のような平面における $a = 4, b = 2$, 充填率 $c = 0.4$ の理想弁当を用いて考察を行う。

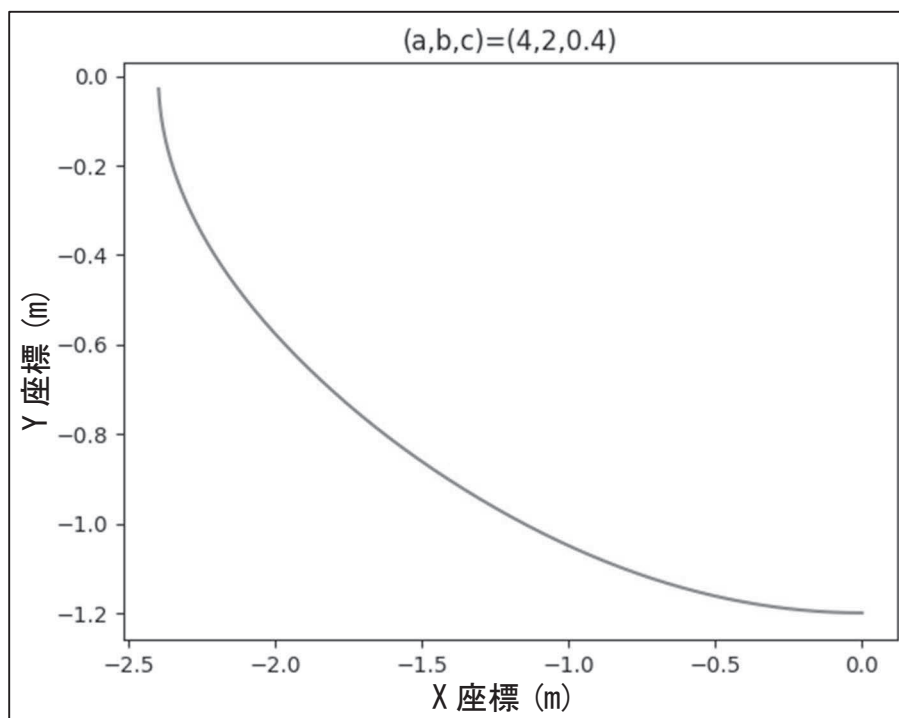


図 15 理想弁当の重心移動

ここで、図 13 のときに理想弁当にはたらく力のモーメントについて python を用いて計算した。得られた結果・グラフを以下に示す(図 16)。以下のグラフは、縦軸に図 13 の点 B にはたらく力のモーメントを、横軸に理想弁当が傾いている角度 θ をとり、理想弁当の傾きと弁当にはたらく力のモーメントの関係を示したものである。

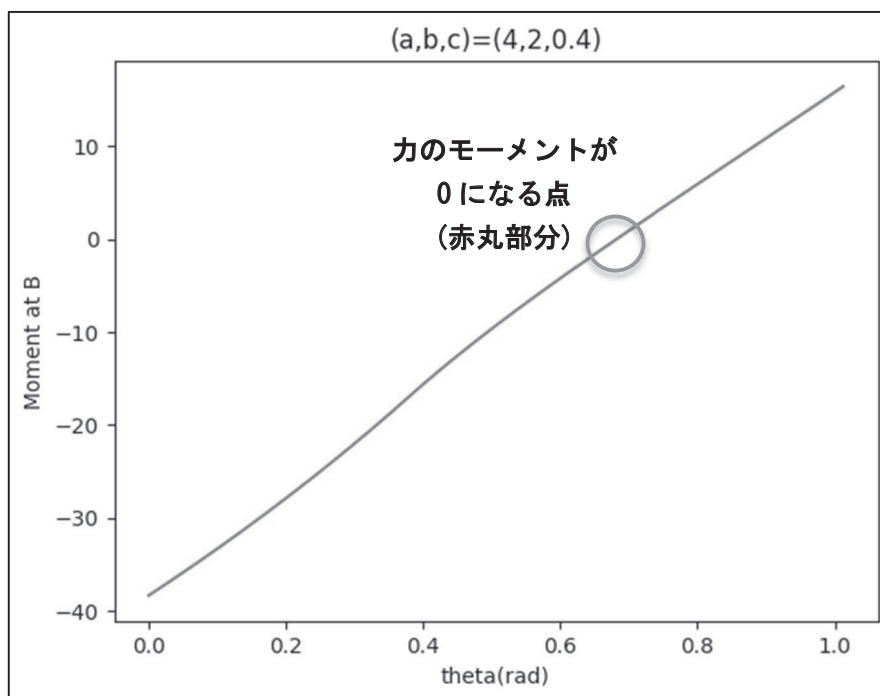


図 16 理想弁当の力のモーメント

図 16 より、理想弁当の挙動には臨界角 φ が存在し、臨界角 φ より小さい角度だけ理想弁当が傾いたときには理想弁当は元の弁当箱の底面が水平な状態に戻ろうとするモーメントがはたらくが、臨界角 φ より大きい角度だけ理想弁当が傾いたときには理想弁当は元に戻らず、新しい別の安定する角度に移動しようとするモーメントがはたらくことが示唆される。

さらに、理想弁当の諸条件を変えた状態で、理想弁当にはたらく力のモーメントについて考察を行った。はじめに、理想弁当の辺の比を変化させることにした。図 13 における底面からの理想弁当の高さ a を変化させ、弁当箱の高さ a と理想弁当にはたらく力のモーメントとの関係をグラフに表示した（図 17）。

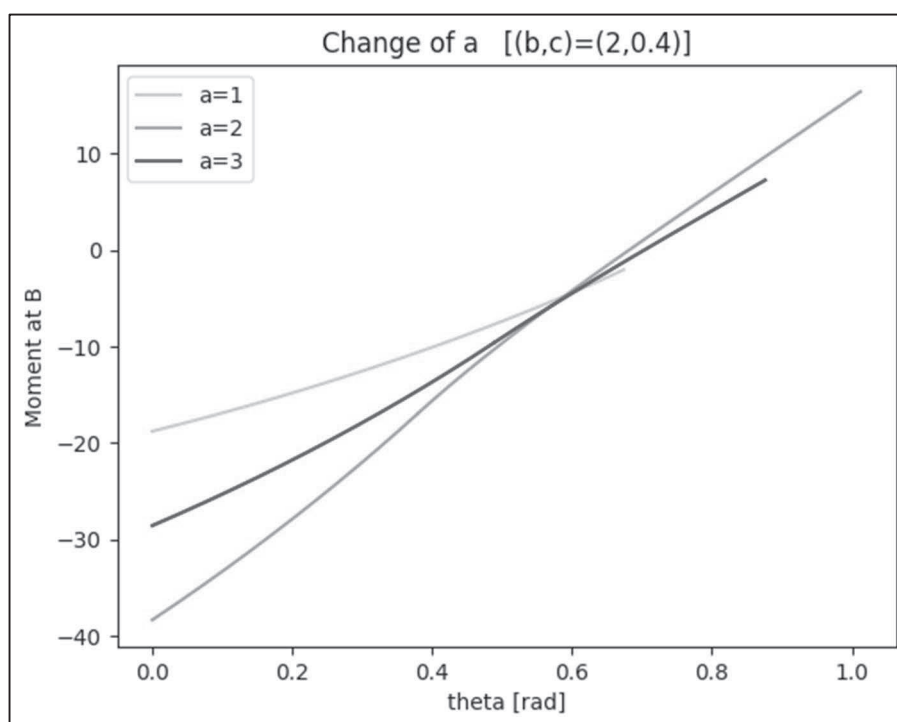


図 17 弁当箱の高さ a と力のモーメントの関係

図 17 のグラフにおいて、 $a = 1$ のとき、 $a = 2$ のとき、 $a = 3$ のときと順番にグラフの形状を見てみると、グラフにおける位置関係に規則性は見られないことが示唆される。したがって、弁当箱の形状の変化によって、力のモーメントのグラフが不規則に変化することが考察できる。

続いて、理想弁当の重さを変化させることにした。図 13 における弁当箱の中身の質量 m を変化させ、理想弁当の質量 m と理想弁当にはたらく力のモーメントとの関係をグラフに表示した（図 18）。

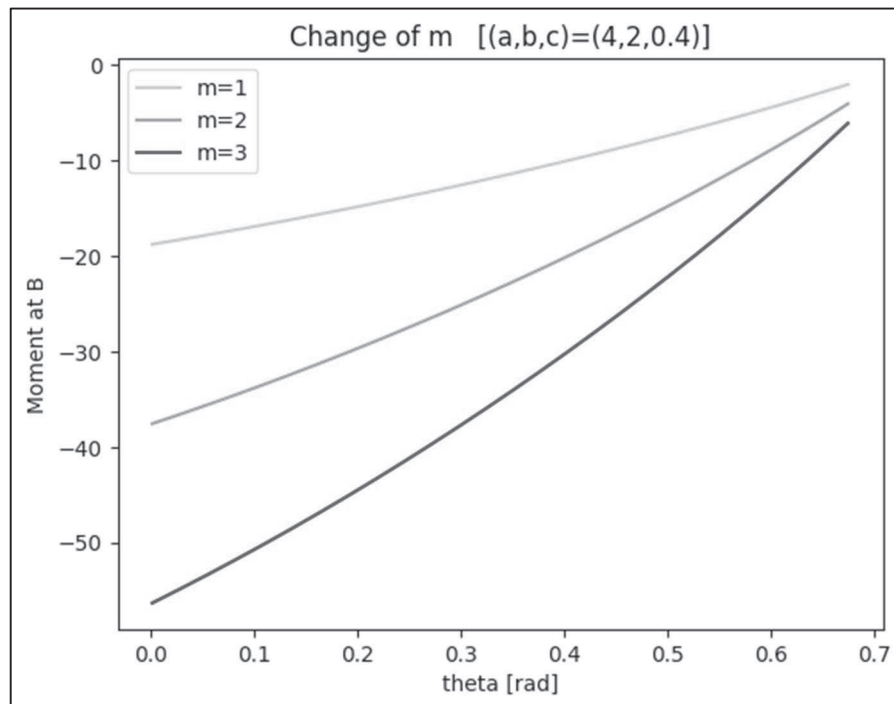


図 18 弁当箱の質量 m と力のモーメントの関係

図 18 のグラフにおいて、 $m = 1$ のとき、 $m = 2$ のとき、 $m = 3$ のときと順番にグラフの形状を見てみると、グラフにおける位置関係は、理想弁当の質量 m の値が大きくなるにつれて下方へ移動していることが分かる。したがって、理想弁当の質量を重くすることによって、弁当箱が傾いたときの元に状態に戻る働きが強くなることが分かる。

第 5 章 レジ袋を持ち歩く際の動き(加速度)の分析

第 1 節 本実験の概要

加速度センサ(ポケットラボ)を手に持った状態で歩き、レジ袋を持ち運ぶ際の手元における加速度を計測し、フーリエ変換・フーリエ級数展開などを用いて分析する。

第 2 節 実験目的

レジ袋を持ち運ぶ際の実際の加速度を記録することで、理論と合致しているか確認するとともに、中身が傾く原因究明の足掛かりとする。

第 3 節 実験方法

- (1) ポケットラボ (無線加速度計、ケニス株式会社製) (図 19) の側面についている電源ボタンを押して起動し、実験で使用する端末とポケットラボ (図 19) とを無線 (Bluetooth) で接続した。
- (2) 加速度をできるだけ細かい間隔で記録するために加速度を記録する間隔を設定の限界値である 0.02 秒おきに設定した。その他、詳細なポケットラボの記録設定や詳細なペアリングの方法などはポケットラボの取扱説明書を参考に行った[4]。なお、本論文に設定を変更した旨が記載されている事項以外はすべてデフォルトの設定のまま実験を行っている。また、計測にあたって「The PocketLab」アプリがインストールされた端末を使用している。
- (3) ポケットラボにかきこまれている軸方向マークを参照しながら、手にポケットラボを握った。このとき、軸方向マークに記載されている Y 軸の正の方向が鉛直方向となるように握るようにした。
- (4) 一定間隔で足を動かすために、メトロノームを 90 / min に設定して音を鳴らし、その音に合わせて足踏みした。
- (5) しばらく経って持ち運ぶ動きが安定したら、加速度の記録を開始するボタンを押してから約 10 秒間記録を行った。
- (6) (1)～(5)の操作をおもりなし(0 kg), おもり 1 kg, おもり 5 kg の場合の計 3 パターンで同様に行った。
- (7) (1)～(6)の操作を被験者 A, 被験者 B の計 2 パターンで同様に行った。



図 19 ポケットラボ

第 4 節 実験結果

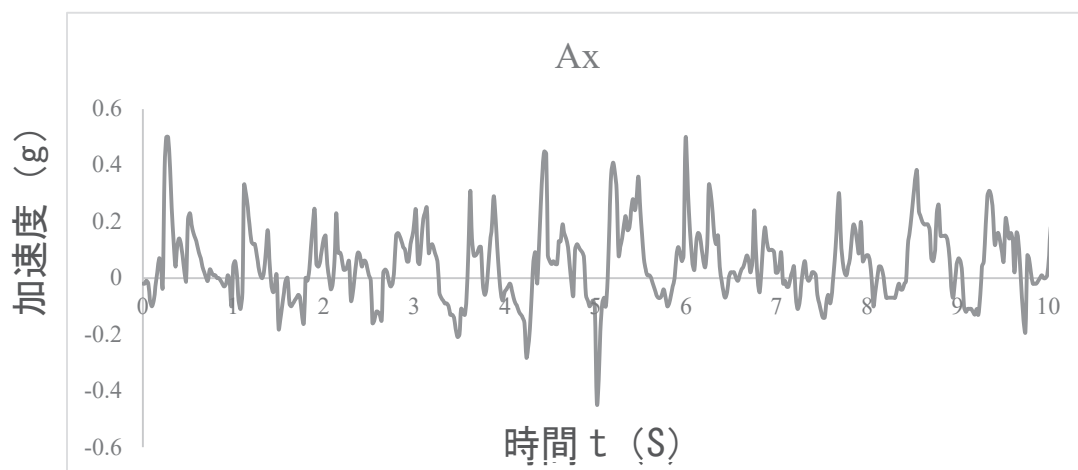
得られた加速度について、水平方向を X 成分、鉛直方向を Y 成分として成分別に測定値の結果をグラフにまとめた。得られたグラフは以下のとおりである。

第1項 被験者 A の場合

(1) 0 kg (おもりなし) のとき

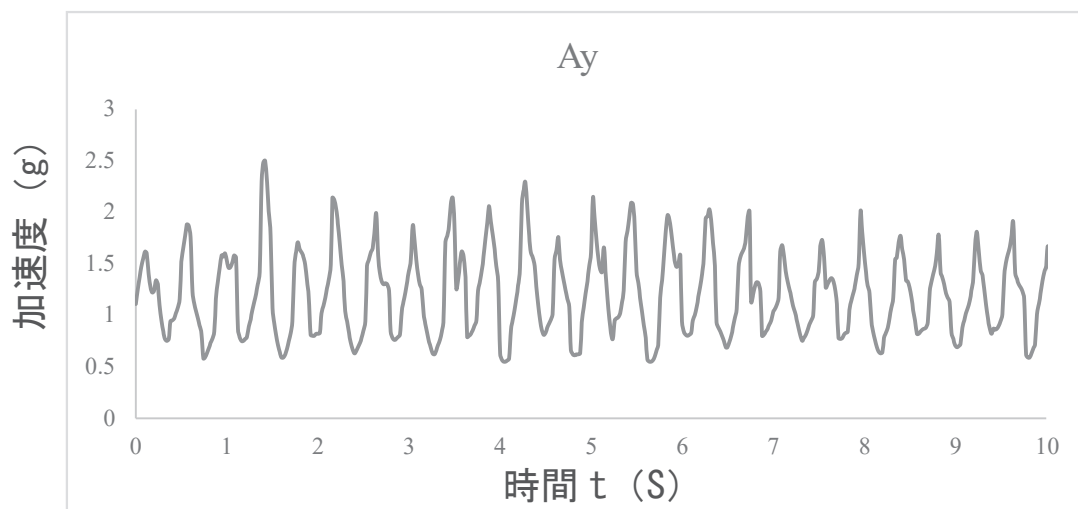
(ア) X 成分

以下のグラフは、横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における加速度計の加速度の X 成分の値をとったものである。このグラフは時間 t の変化に対して歩く際の手元の加速度の X 成分の値がどのように変化するかを表している。



(イ) Y 成分

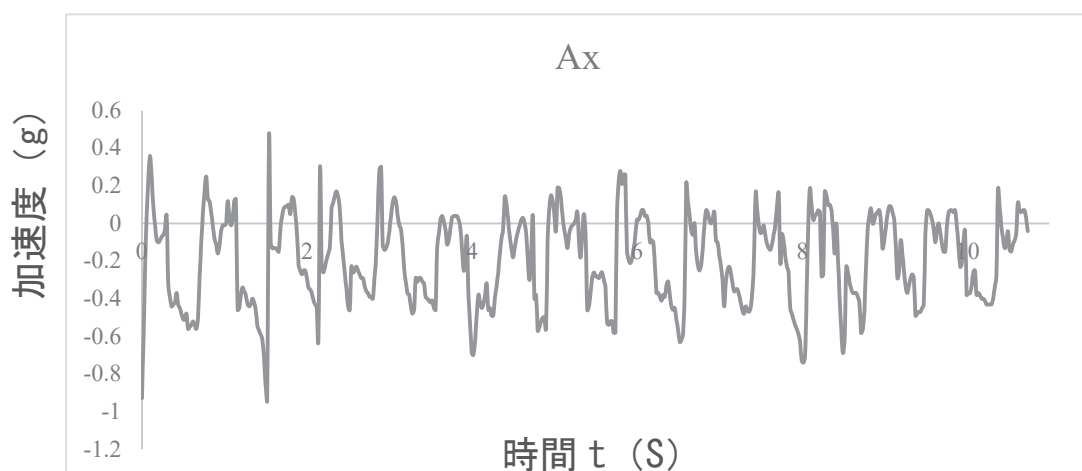
以下のグラフは、横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における加速度計の加速度の Y 成分の値をとったものである。このグラフは時間 t の変化に対して歩く際の手元の加速度の Y 成分の値がどのように変化するかを表している。



(2) 1 kg のとき

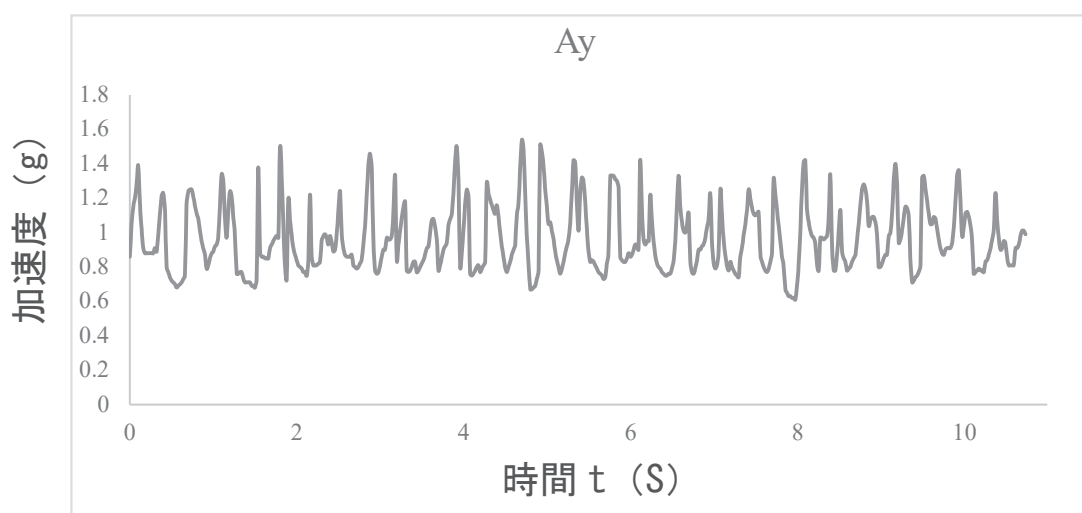
(ア) X 成分

以下のグラフは、横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における加速度計の加速度の X 成分の値をとったものである。このグラフは時間 t の変化に対して 1 kg のおもりを持ち歩く際の手元の加速度の X 成分の値がどのように変化するかを表している。



(イ) Y 成分

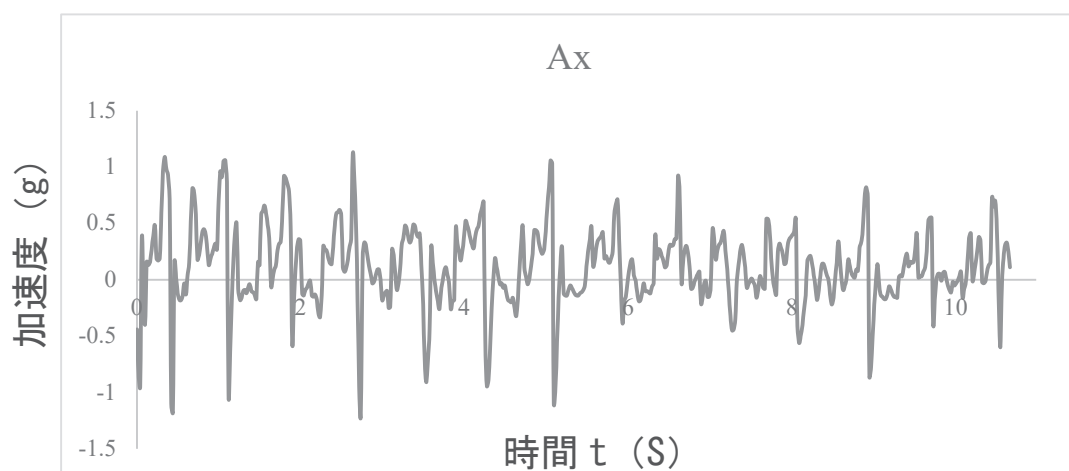
以下のグラフは、横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における加速度計の加速度の Y 成分の値をとったものである。このグラフは時間 t の変化に対して 1 kg のおもりを持ち歩く際の手元の加速度の Y 成分の値がどのように変化するかを表している。



(3) 5 kg のとき

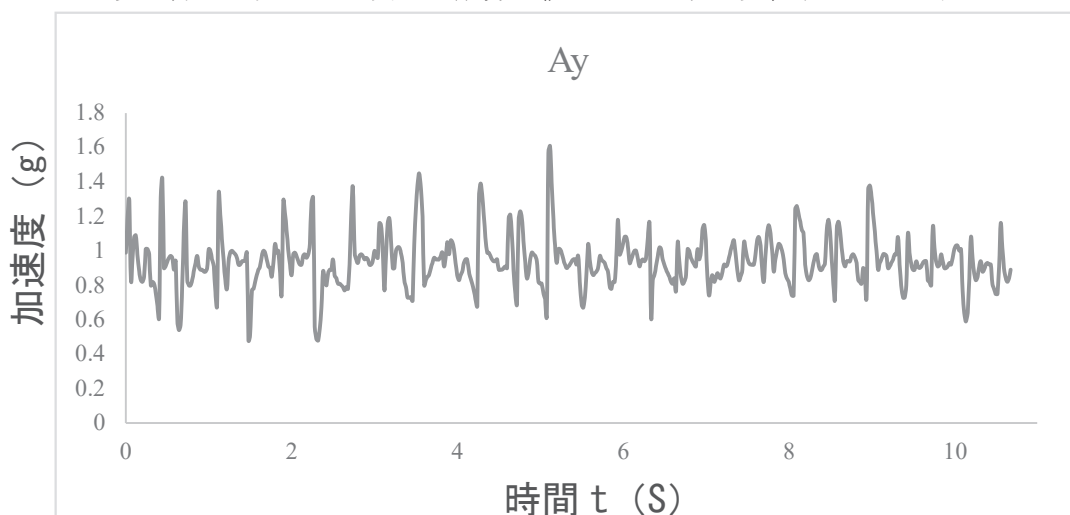
(ア) X 成分

以下のグラフは、横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における加速度計の加速度の X 成分の値をとったものである。このグラフは時間 t の変化に対して 5 kg のおもりを持ち歩く際の手元の加速度の X 成分の値がどのように変化するかを表している。



(イ) Y 成分

以下のグラフは、横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における加速度計の加速度の Y 成分の値をとったものである。このグラフは時間 t の変化に対して 5 kg のおもりを持ち歩く際の手元の加速度の Y 成分の値がどのように変化するのかを表している。

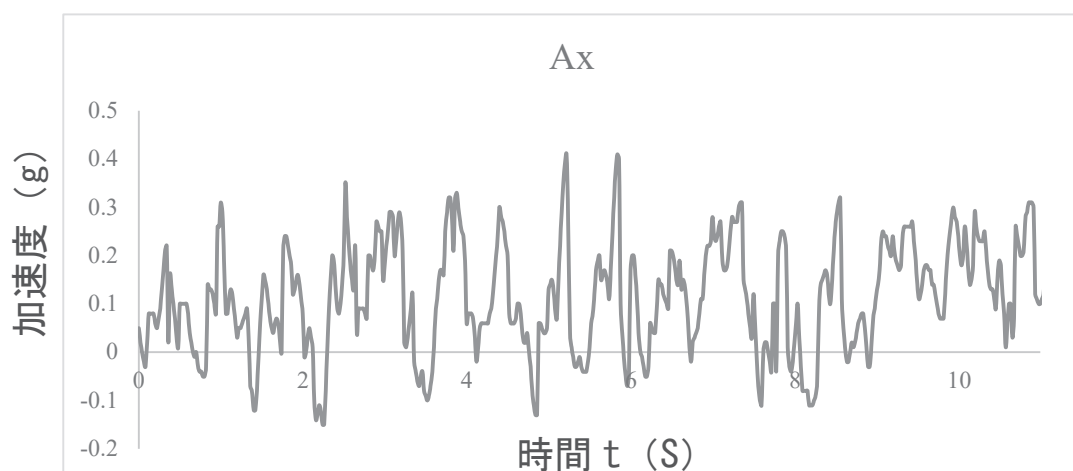


第 2 項 被験者 B の場合

(1) 0 kg (おもりなし) のとき

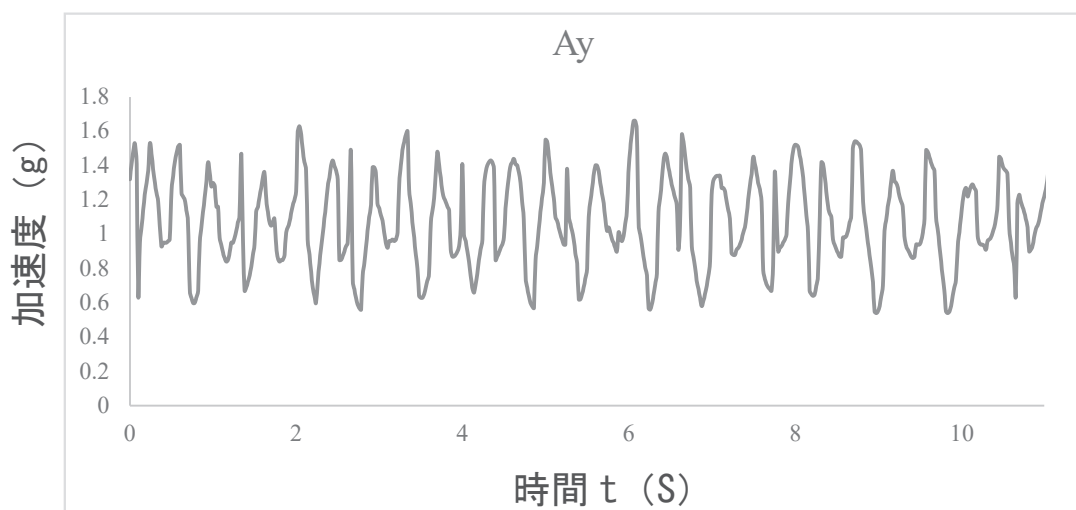
(ア) X 成分

以下のグラフは、横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における加速度計の加速度の X 成分の値をとったものである。このグラフは時間 t の変化に対して歩く際の手元の加速度の X 成分の値がどのように変化するのかを表している。



(イ) Y 成分

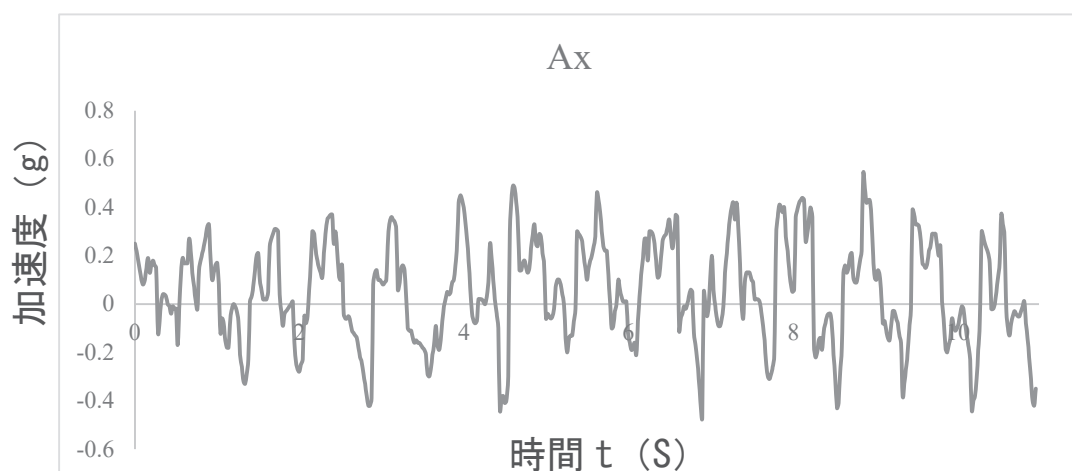
以下のグラフは、横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における加速度計の加速度の Y 成分の値をとったものである。このグラフは時間 t の変化に対して歩く際の手元の加速度の Y 成分の値がどのように変化するのかを表している。



(2) 1 kg のとき

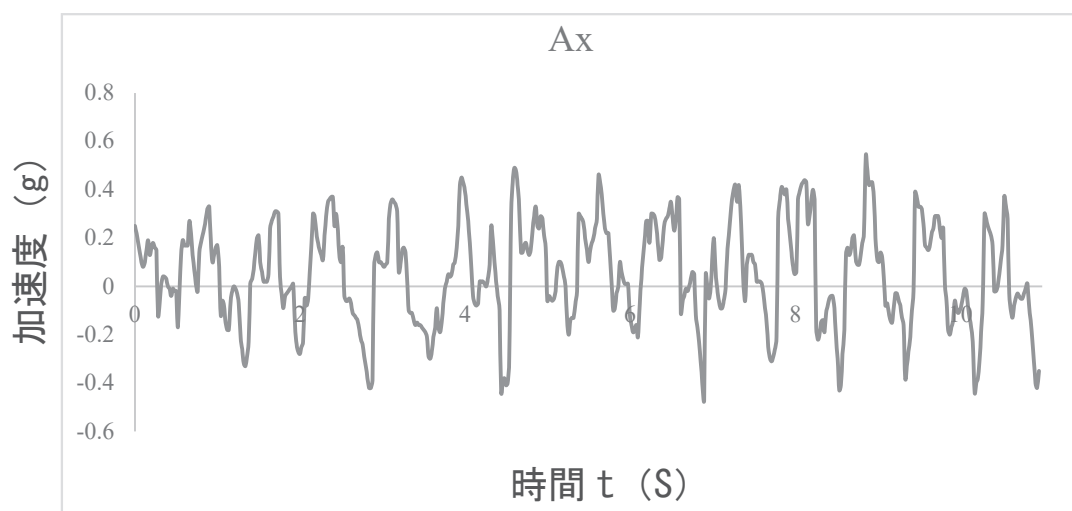
(ア) X 成分

以下のグラフは、横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における加速度計の加速度の X 成分の値をとったものである。このグラフは時間 t の変化に対して 1 kg のおもりを持ち歩く際の手元の加速度の X 成分の値がどのように変化するのかを表している。



(イ) Y 成分

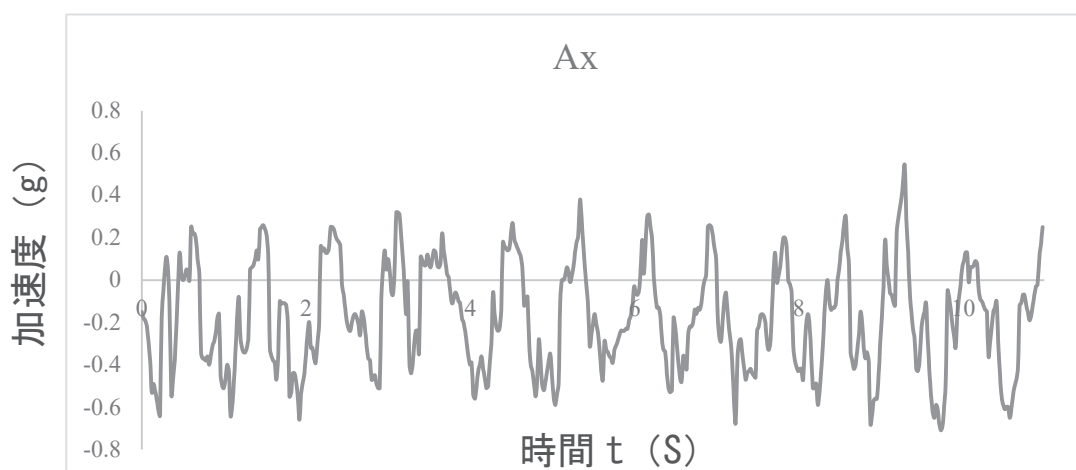
以下のグラフは、横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における加速度計の加速度の Y 成分の値をとったものである。このグラフは時間 t の変化に対して 1 kg のおもりを持ち歩く際の手元の加速度の Y 成分の値がどのように変化するのかを表している。



(3) 5 kg のとき

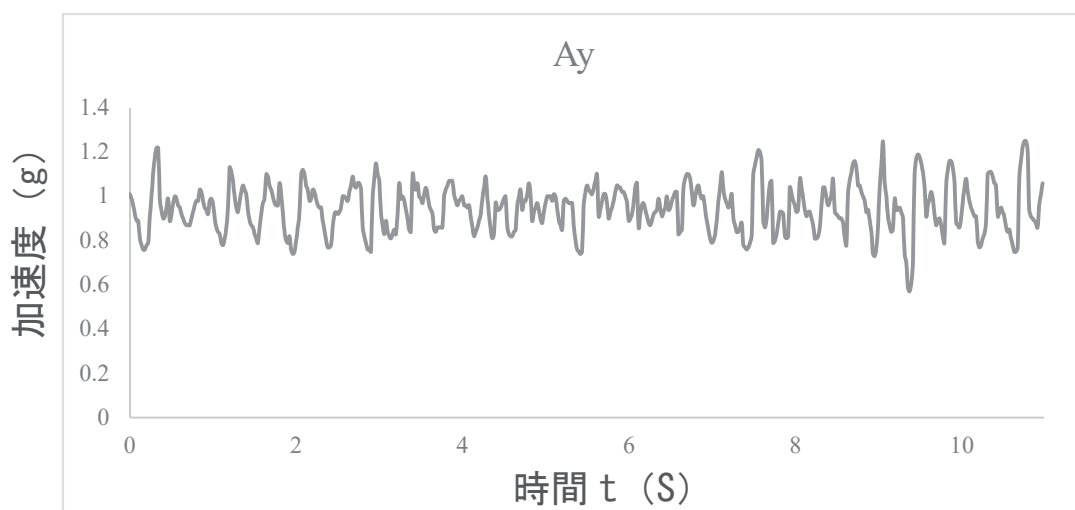
(ア) X 成分

以下のグラフは、横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における加速度計の加速度の X 成分の値をとったものである。このグラフは時間 t の変化に対して 5 kg のおもりを持ち歩く際の手元の加速度の X 成分の値がどのように変化するのかを表している。



(イ) Y 成分

以下のグラフは、横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における加速度計の加速度の Y 成分の値をとったものである。このグラフは時間 t の変化に対して 5 kg のおもりを持ち歩く際の手元の加速度の Y 成分の値がどのように変化するかを表している。



第 5 節 考察

得られたデータを分析するにあたって、周期が視覚的に読み取りやすかった部分を X 成分の周期基準で 4 周期分切り取る。

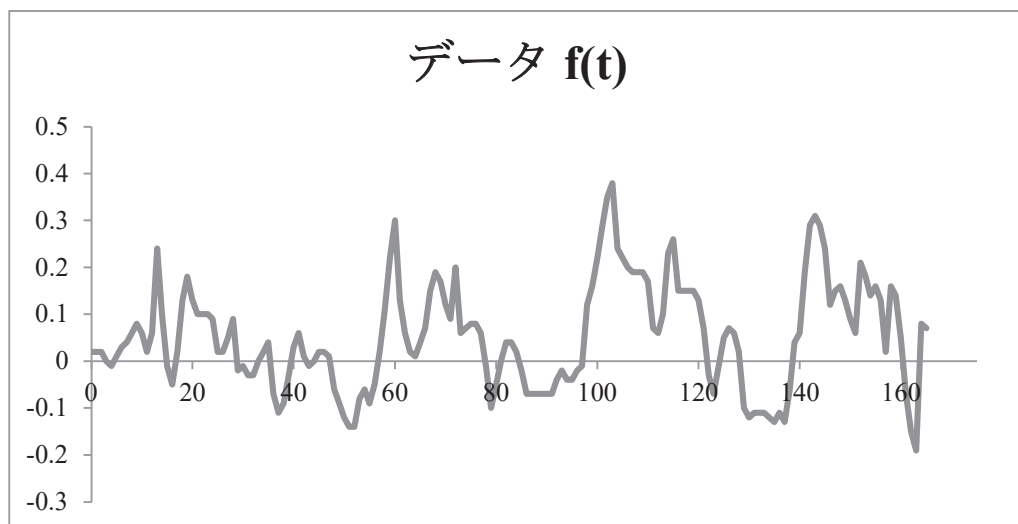
切り取ったデータを離散フーリエ変換することによって主要な三角関数の波のみを取り出すことを試みる。離散フーリエ変換は表計算ソフト Excel を用いて行った。離散フーリエ変換を行うにあたって、インターネット上の記事に添付されていたファイルを一部改変して離散フーリエ変換を行うファイルを作成した[4]。離散フーリエ変換する対象となったデータや離散フーリエ変換することによって得られた振幅スペクトルなどのグラフは以下のとおりである。

第 1 項 被験者 A の場合

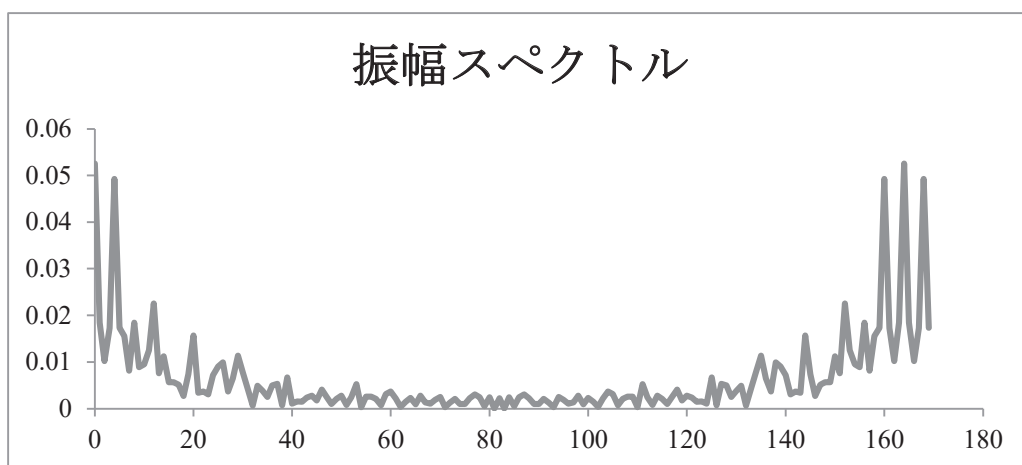
(1) 0 kg (おもりなし) のとき

(ア) X 成分

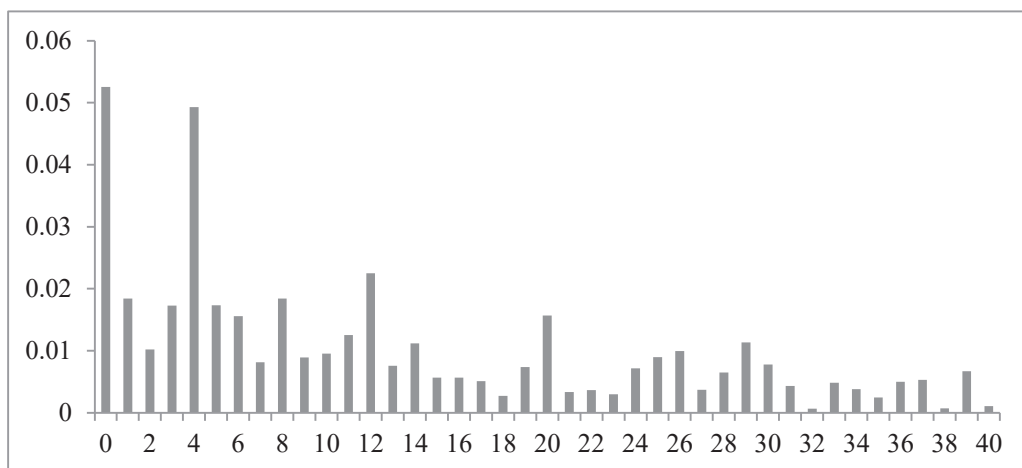
以下のグラフは、横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における加速度計の加速度の X 成分の値をとったものである。このグラフは時間 t の変化に対して歩く際の手元の加速度の X 成分の値が 4 周期の間に、どのように変化するのかを表している。



上のデータに対して離散フーリエ変換とフーリエ級数展開を行った。以下のグラフは、横軸に周波数 t 、縦軸に周波数 t における振幅スペクトルの値をとったものである。このグラフは周波数 t における三角関数(cos)によって上データをどのくらい説明することができるのかを表している。



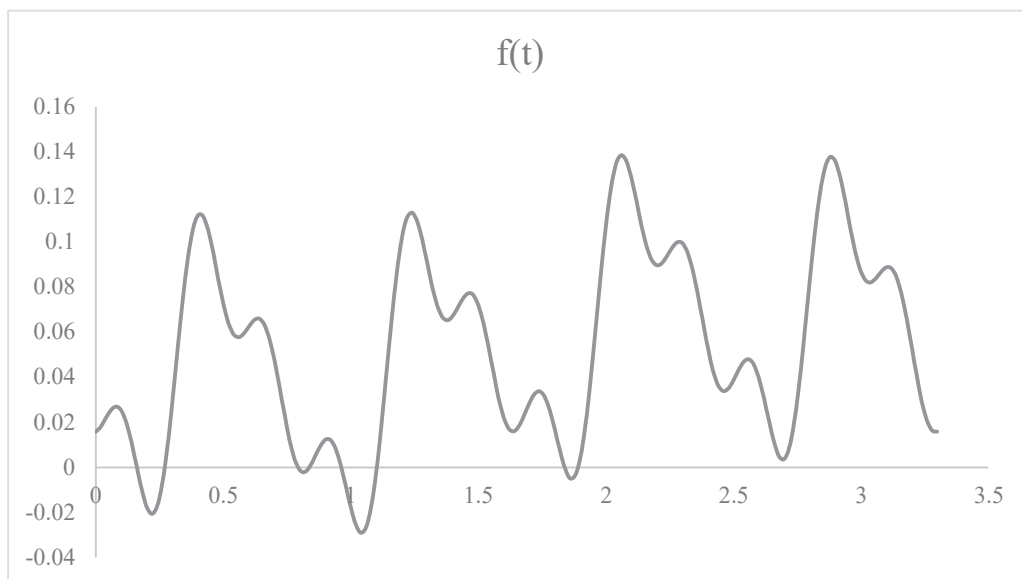
上のグラフでは周波数 t の全体としての変化はつかめるものの、周波数 t が大きい具体的な値が読み取れないため、周波数 t の範囲を 0 から 40 までに制限して縦軸には振幅スペクトルの値をとってグラフを再作成した。そのグラフを以下に示す。



上のグラフから、振幅スペクトルの値が他の値と比べて比較的大きい周波数 t を 6 個程度抽出する。また、抽出した周波数 t のときの振幅スペクトルの値と位相も抽出しておく。これらの数値から逆フーリエ変換を行い、元のデータに近似できているかどうか検証する。横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における加速度をとってグラフを作成すると下のようになる。また、逆フーリエ変換によって算出された時間と加速度との間の関数を $f(t)$ とすると、

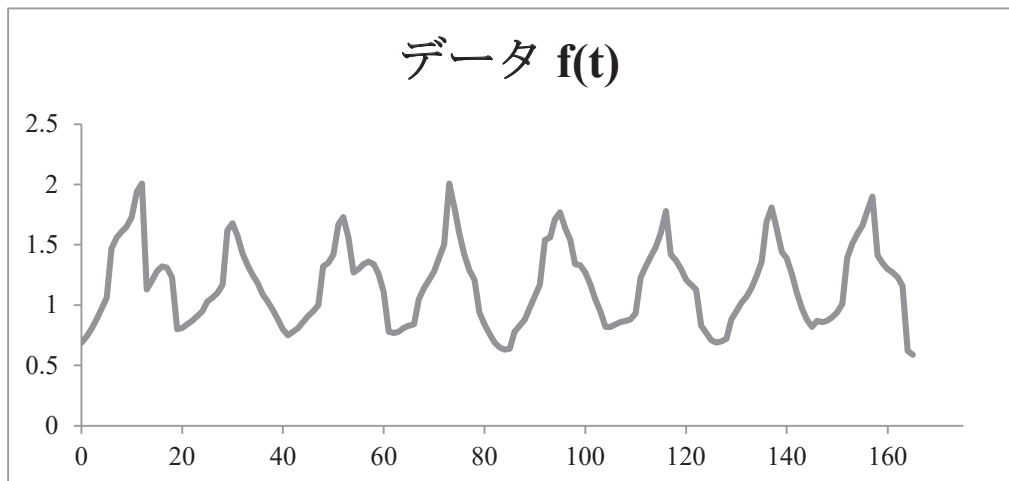
$$f(t) = 0.053 \cos 0 + 0.018 \cos\left(\frac{1 \times 2\pi}{N}t + 1.6\right) + 0.049 \cos\left(\frac{4 \times 2\pi}{N}t + 2.4\right) \\ + 0.018 \cos\left(\frac{8 \times 2\pi}{N}t - 0.098\right) + 0.023 \cos\left(\frac{12 \times 2\pi}{N}t - 2.5\right)$$

となる。(N はデータ数)

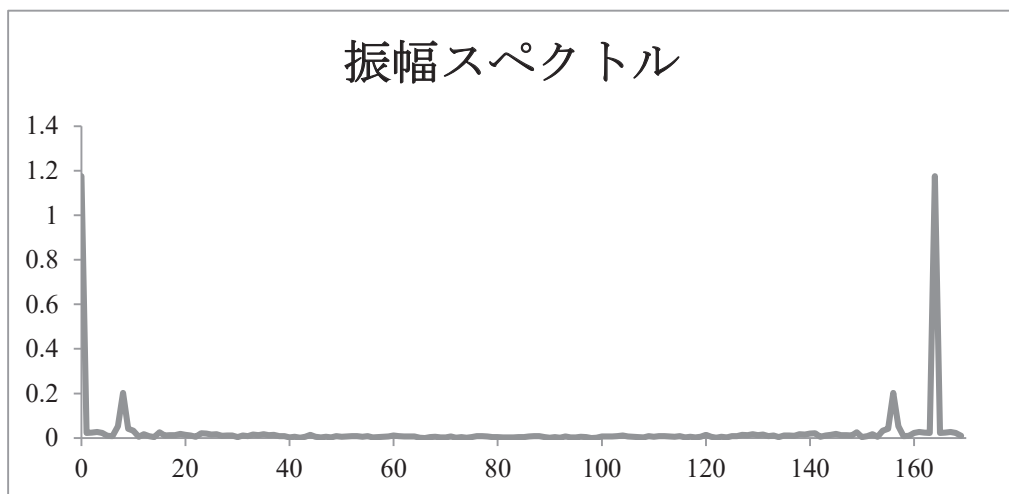


(イ) Y 成分

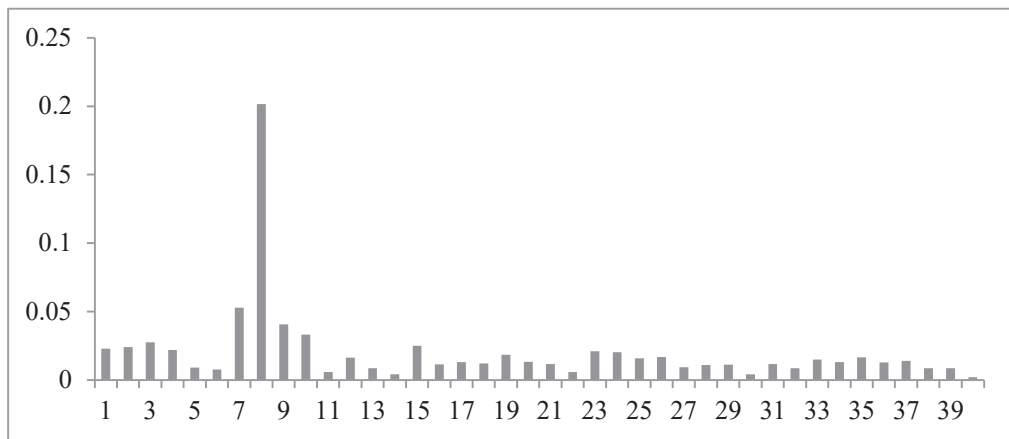
以下のグラフは、横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における加速度計の加速度の Y 成分の値をとったものである。このグラフは時間 t の変化に対して歩く際の手元の加速度の Y 成分の値が 4 周期の間に、どのように変化するかを表している。



上のデータに対して離散フーリエ変換とフーリエ級数展開を行った。以下のグラフは、横軸に周波数 t 、縦軸に周波数 t における振幅スペクトルの値をとったものである。このグラフは周波数 t における三角関数($\cos$)によって上データをどのくらい説明することができるのかを表している。



上のグラフでは周波数 t の全体としての変化はつかめるものの、周波数 t が大きい具体的な値が読み取れないため、周波数 t の範囲を 1 から 40 までに制限して縦軸には振幅スペクトルの値をとってグラフを再作成した。そのグラフを以下に示す。なお、周波数 0 の値が他の値に比べて大きいので、ほかのデータを読み取りやすくするために周波数 0 を除いたグラフとしている。



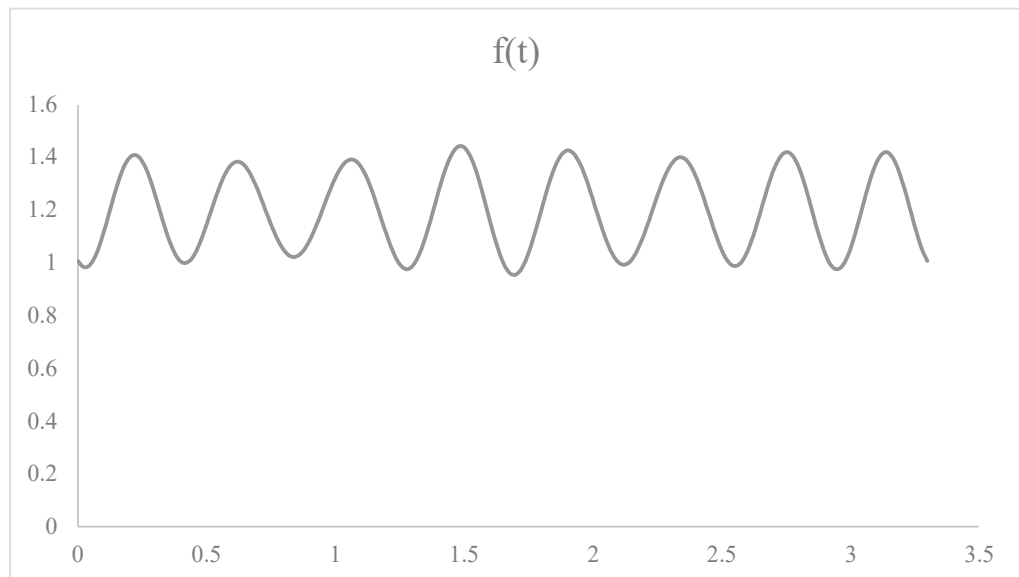
上のグラフから、振幅スペクトルの値が他の値と比べて比較的大きい周波数 t を 6 個程度抽出する。また、抽出した周波数 t のときの振幅スペクトルの値と位相も抽出しておく。これらの数値から逆フーリエ変換を行い、元のデータに近似できているかどうか検証する。横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における加速度をとってグラフを作成すると下のようになる。また、逆フーリエ変換によって算出された時間 t と加速度との間の関数を $f(t)$ とすると、

$$f(t) = 1.18 \cos 0$$

$$+ 0.053 \cos\left(\frac{7 \times 2\pi}{N}t - 0.74\right) + 0.20 \cos\left(\frac{8 \times 2\pi}{N}t + 2.5\right)$$

$$+ 0.040 \cos\left(\frac{9 \times 2\pi}{N}t + 2.9\right) + 0.033 \cos\left(\frac{10 \times 2\pi}{N}t + 2.9\right)$$

となる。(N はデータ数)

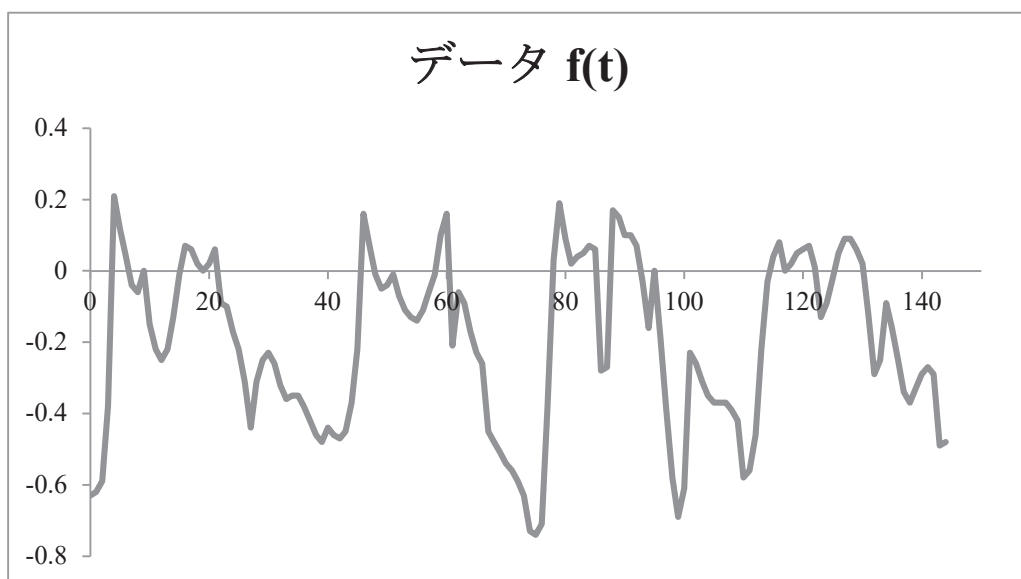


(2) 1 kg のとき

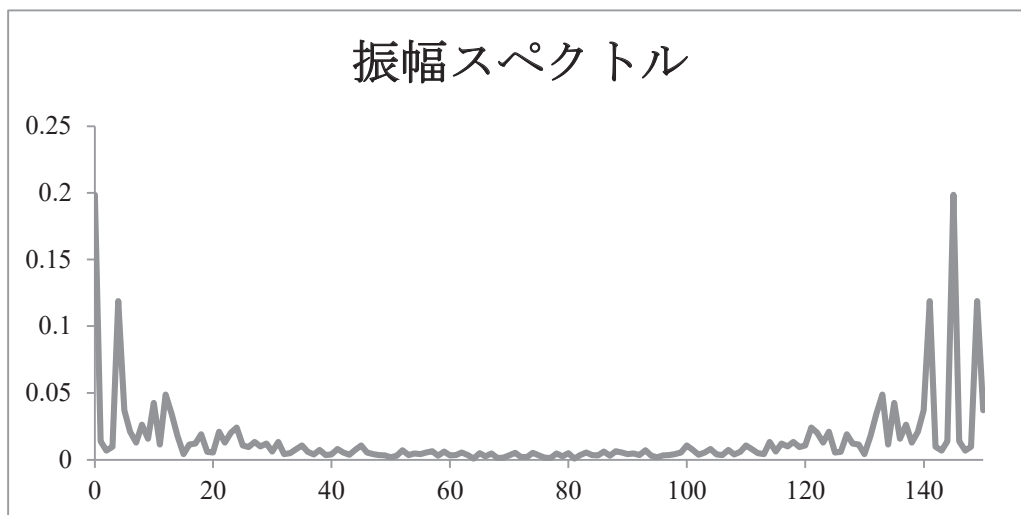
(ア) X 成分

以下のグラフは、横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における加速度計の加速度の X 成分の値をとったものである。このグラフは時間 t の変化に対して 1 kg のおもりを

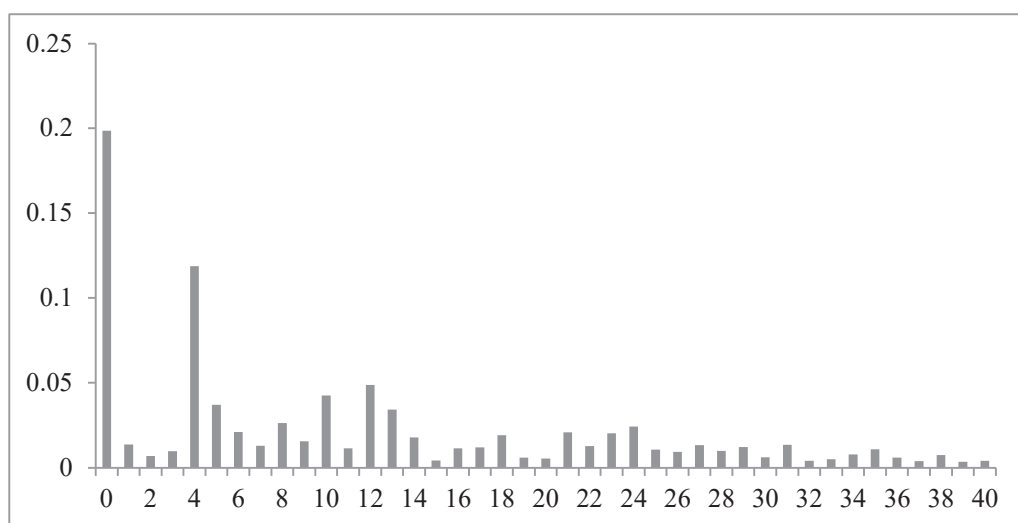
持ち歩く際の手元の加速度の X 成分の値が 4 周期の間に、どのように変化するかを表している。



上のデータに対して離散フーリエ変換とフーリエ級数展開を行った。以下のグラフは、横軸に周波数 t 、縦軸に周波数 t における振幅スペクトルの値をとったものである。このグラフは周波数 t における三角関数($\cos$)によって上データをどのくらい説明することができるのかを表している。



上のグラフでは周波数 t の全体としての変化はつかめるものの、周波数 t が大きい具体的な値が読み取れないため、周波数 t の範囲を 0 から 40 までに制限して縦軸には振幅スペクトルの値をとってグラフを再作成した。そのグラフを以下に示す。

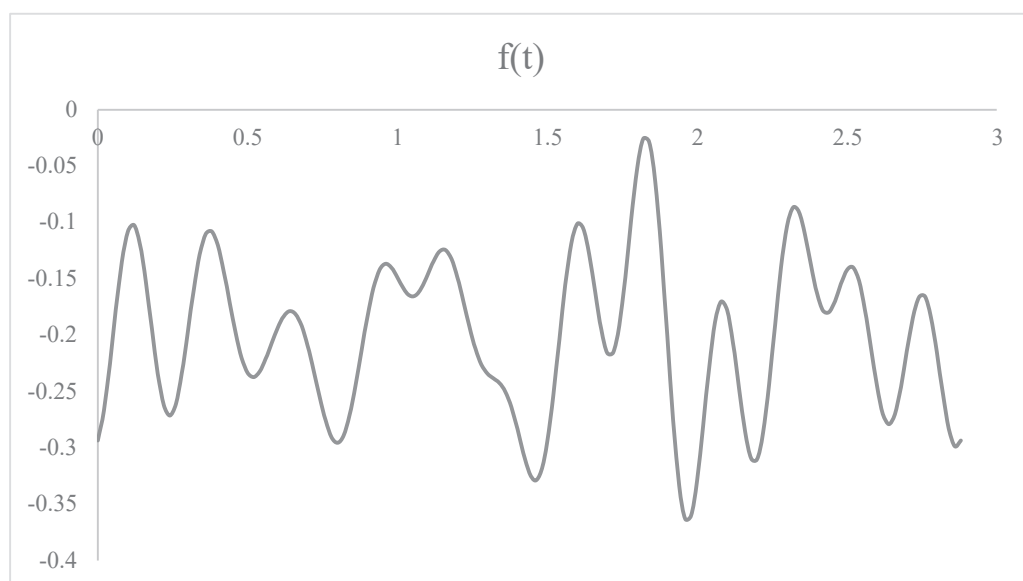


上のグラフから、振幅スペクトルの値が他の値と比べて比較的大きい周波数 t を 6 個程度抽出する。また、抽出した周波数 t のときの振幅スペクトルの値と位相も抽出しておく。これらの数値から逆フーリエ変換を行い、元のデータに近似できているかどうか検証する。横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における加速度をとってグラフを作成すると下のようになる。また、逆フーリエ変換によって算出された時間 t と加速度との間の関数を $f(t)$ とすると、

$$f(t) = 0.199 \cos \pi$$

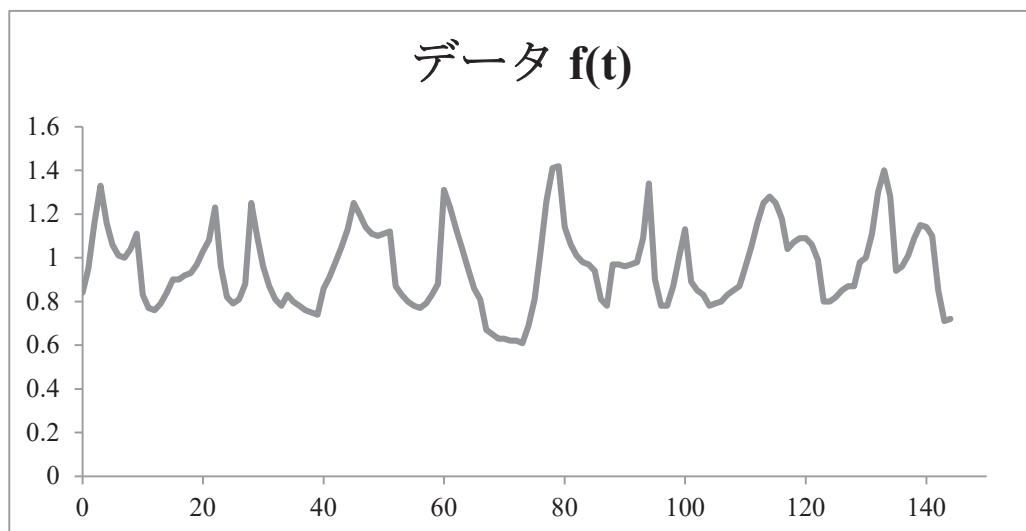
$$+ 0.053 \cos\left(\frac{4 \times 2\pi}{N}t - 2.7\right) + 0.037 \cos\left(\frac{5 \times 2\pi}{N}t - 0.048\right) \\ + 0.042 \cos\left(\frac{10 \times 2\pi}{N}t - 2.2\right) \\ + 0.049 \cos\left(\frac{12 \times 2\pi}{N}t + 2.4\right) + 0.034 \cos\left(\frac{13 \times 2\pi}{N}t - 2.3\right)$$

となる。(N はデータ数)

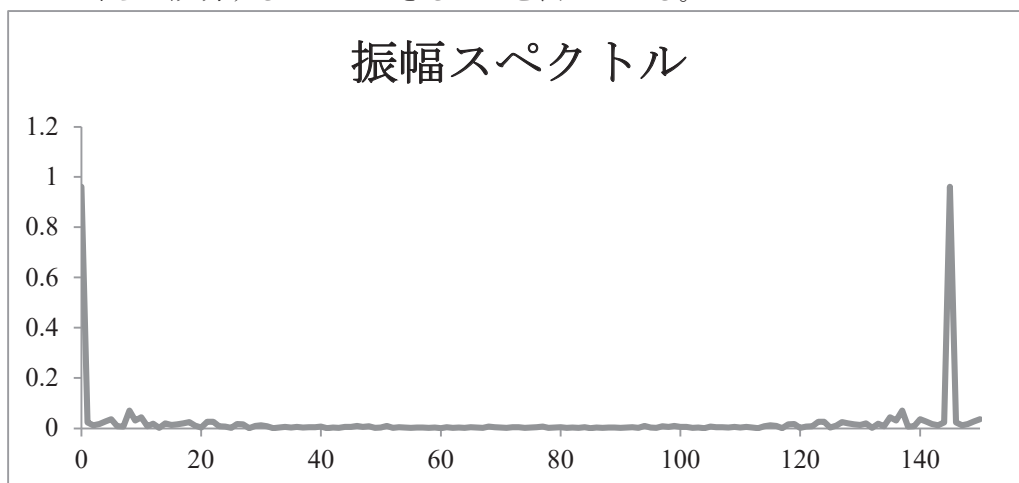


(イ) Y 成分

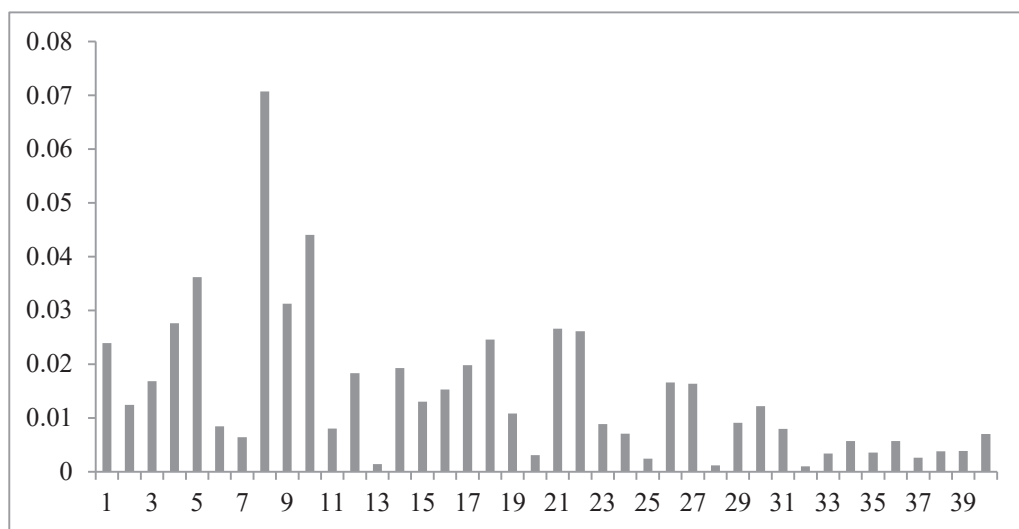
以下のグラフは、横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における加速度計の加速度の Y 成分の値をとったものである。このグラフは時間 t の変化に対して 1 kg のおもりを持ち歩く際の手元の加速度の Y 成分の値が 4 周期の間に、どのように変化するかを表している。



上のデータに対して離散フーリエ変換とフーリエ級数展開を行った。以下のグラフは、横軸に周波数 t 、縦軸に周波数 t における振幅スペクトルの値をとったものである。このグラフは周波数 t における三角関数($\cos$)によって上データをどのくらい説明することができるのかを表している。



上のグラフでは周波数 t の全体としての変化はつかめるものの、周波数 t が大きい具体的な値が読み取れないため、周波数 t の範囲を 1 から 40 までに制限して縦軸には振幅スペクトルの値をとってグラフを再作成した。そのグラフを以下に示す。なお、周波数 0 の値が他の値に比べて大きいので、ほかのデータを読み取りやすくするために周波数 0 を除いたグラフとしている。

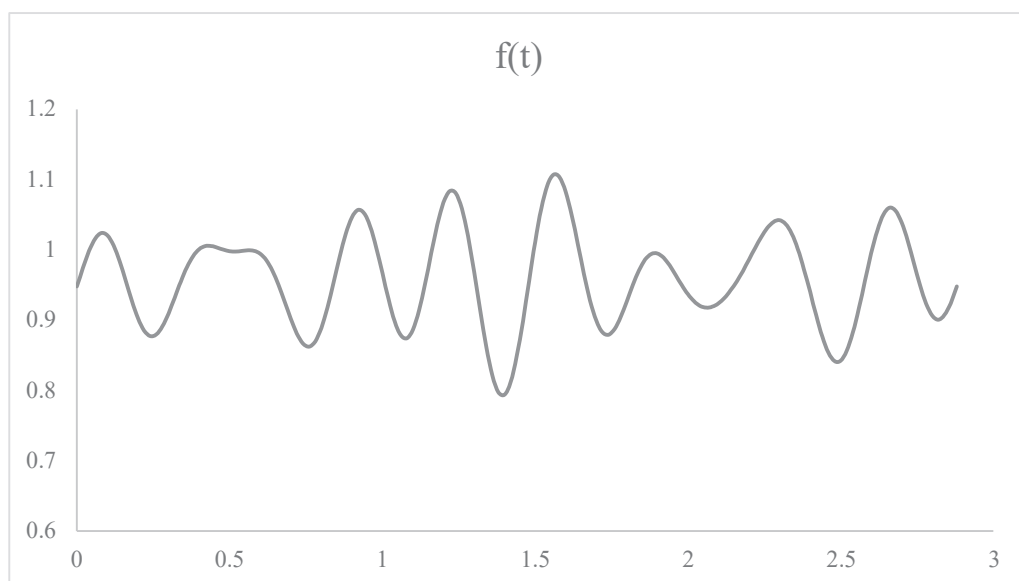


上のグラフから、振幅スペクトルの値が他の値と比べて比較的大きい周波数 t を 6 個程度抽出する。また、抽出した周波数 t のときの振幅スペクトルの値と位相も抽出しておく。これらの数値から逆フーリエ変換を行い、元のデータに近似できているかどうか検証する。横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における加速度をとってグラフを作成すると下のようになる。また、逆フーリエ変換によって算出された時間 t と加速度との間の関数を $f(t)$ とすると、

$$f(t) = 0.96 \cos 0$$

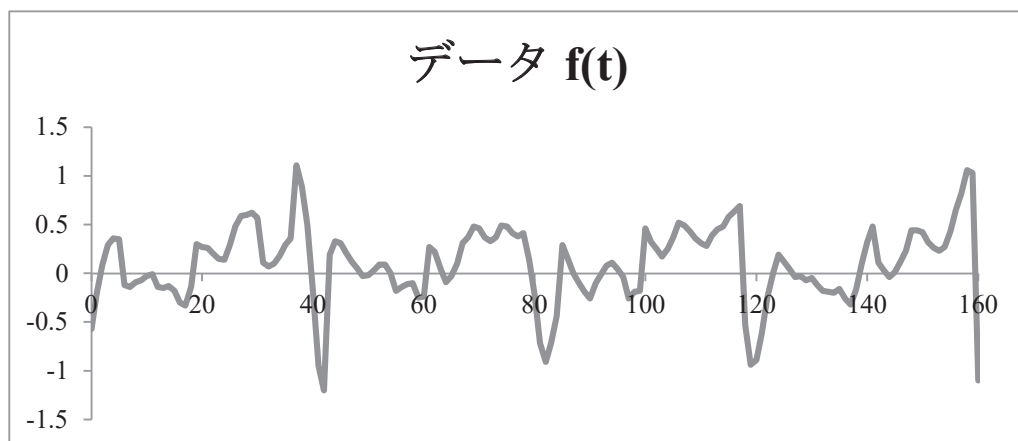
$$+ 0.036 \cos\left(\frac{5 \times 2\pi}{N}t + 1.0\right) + 0.070 \cos\left(\frac{8 \times 2\pi}{N}t - 2.4\right) \\ + 0.031 \cos\left(\frac{9 \times 2\pi}{N}t + 0.22\right) + 0.044 \cos\left(\frac{10 \times 2\pi}{N}t - 1.8\right)$$

となる。(N はデータ数)

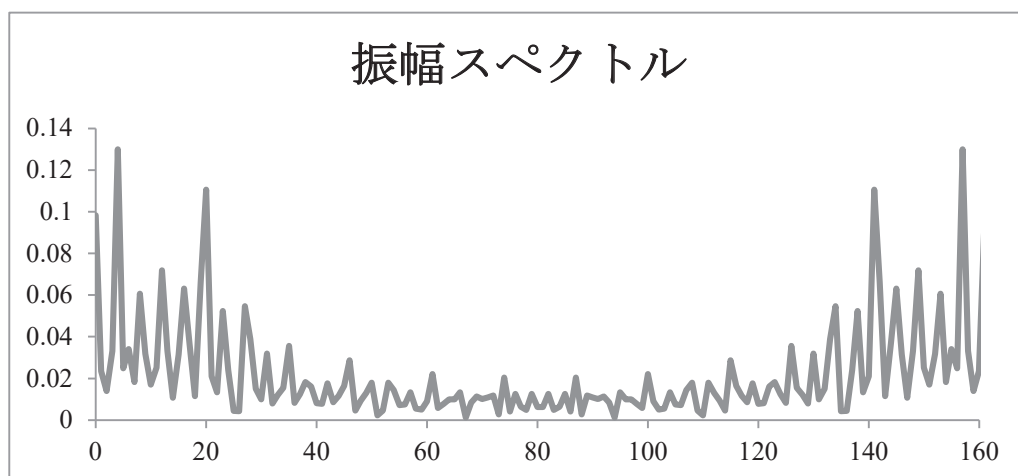


- (3) 5 kg のとき
(ア) X 成分

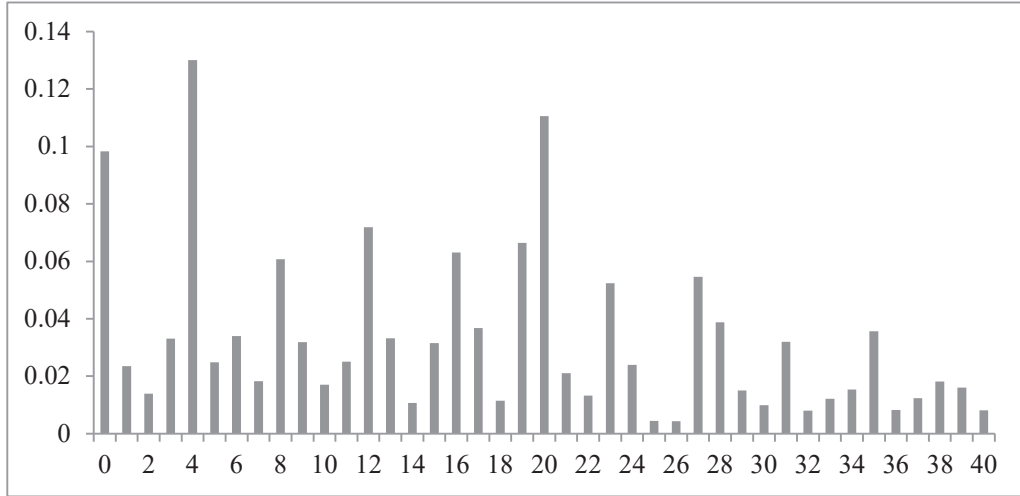
以下のグラフは、横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における加速度計の加速度の X 成分の値をとったものである。このグラフは時間 t の変化に対して 5 kg のおもりを持ち歩く際の手元の加速度の X 成分の値が 4 周期の間に、どのように変化するかを表している。



上のデータに対して離散フーリエ変換とフーリエ級数展開を行った。以下のグラフは、横軸に周波数 t 、縦軸に周波数 t における振幅スペクトルの値をとったものである。このグラフは周波数 t における三角関数($\cos$)によって上データをどのくらい説明することができるのかを表している。



上のグラフでは周波数 t の全体としての変化はつかめるものの、周波数 t が大きい具体的な値が読み取れないため、周波数 t の範囲を 0 から 40 までに制限して縦軸には振幅スペクトルの値をとってグラフを再作成した。そのグラフを以下に示す。



上のグラフから、振幅スペクトルの値が他の値と比べて比較的大きい周波数 t を 6 個程度抽出する。また、抽出した周波数 t のときの振幅スペクトルの値と位相も抽出しておく。これらの数値から逆フーリエ変換を行い、元のデータに近似できているかどうか検証する。横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における加速度をとってグラフを作成すると下のようになる。また、逆フーリエ変換によって算出された時間 t と加速度との間の関数を $f(t)$ とすると、

$$f(t) = 0.098 \cos 0$$

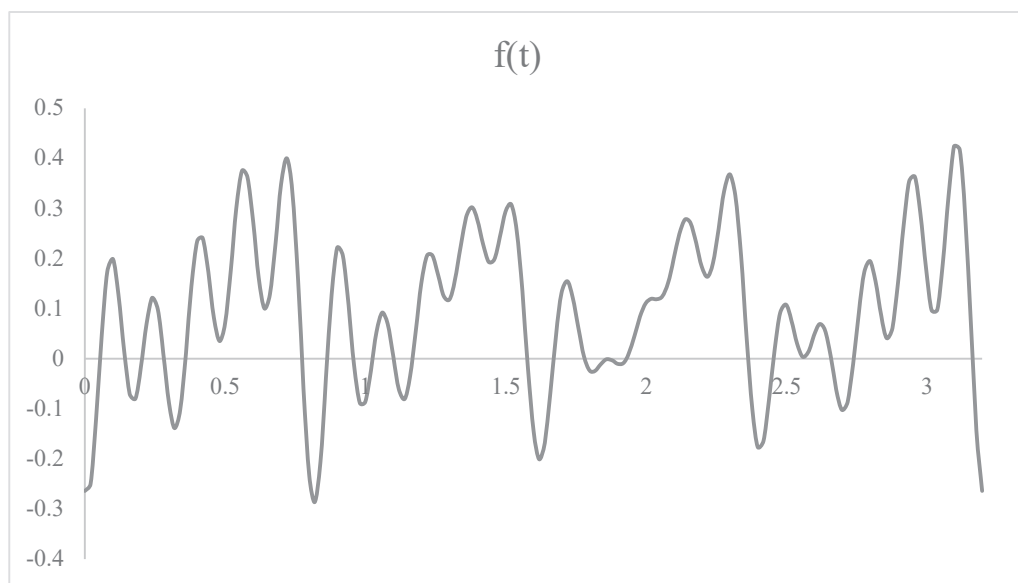
$$+ 0.13 \cos\left(\frac{4 \times 2\pi}{N}t + 1.7\right) + 0.060 \cos\left(\frac{8 \times 2\pi}{N}t + 3.1\right)$$

$$+ 0.072 \cos\left(\frac{12 \times 2\pi}{N}t + 2.7\right)$$

$$+ 0.063 \cos\left(\frac{16 \times 2\pi}{N}t + 2.6\right)$$

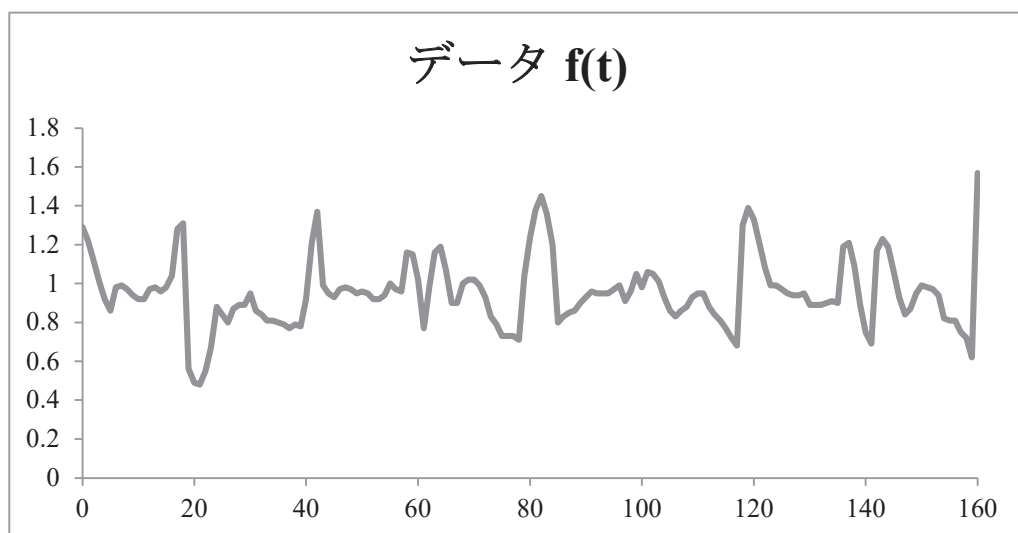
$$+ 0.066 \cos\left(\frac{19 \times 2\pi}{N}t - 2.7\right) + 0.11 \cos\left(\frac{20 \times 2\pi}{N}t + 2.9\right)$$

となる。(N はデータ数)

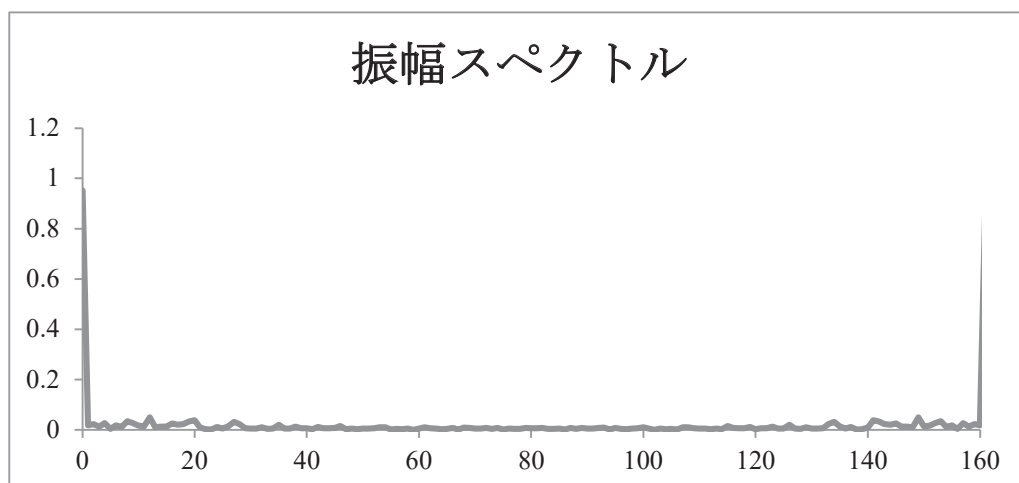


(イ) Y 成分

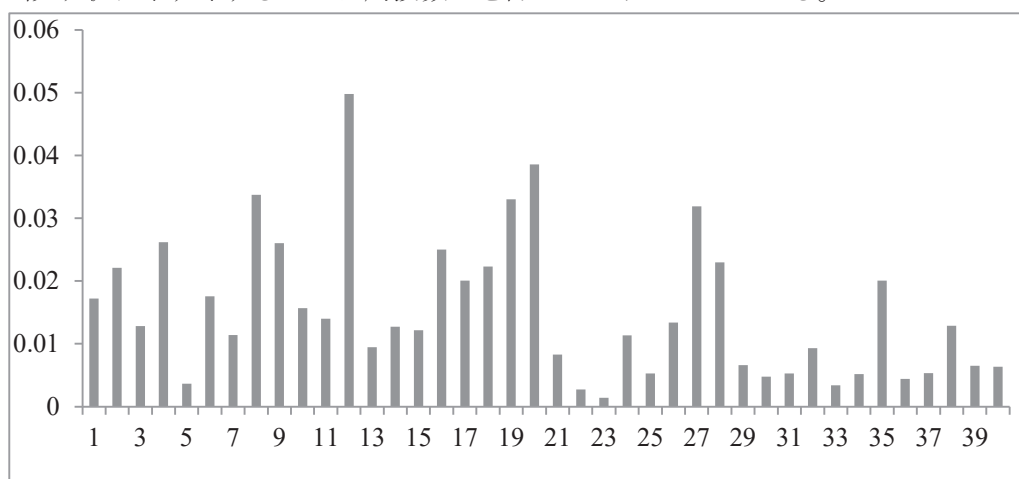
以下のグラフは、横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における加速度計の加速度の Y 成分の値をとったものである。このグラフは時間 t の変化に対して 5 kg のおもりを持ち歩く際の手元の加速度の Y 成分の値が 4 周期の間に、どのように変化するのかを表している。



上のデータに対して離散フーリエ変換とフーリエ級数展開を行った。以下のグラフは、横軸に周波数 t 、縦軸に周波数 t における振幅スペクトルの値をとったものである。このグラフは周波数 t における三角関数($\cos$)によって上データをどのくらい説明することができるのかを表している。



上のグラフでは周波数 t の全体としての変化はつかめるものの、周波数 t が大きい具体的な値が読み取れないため、周波数 t の範囲を 1 から 40 までに制限して縦軸には振幅スペクトルの値をとってグラフを再作成した。そのグラフを以下に示す。なお、周波数 0 の値が他の値に比べて大きいので、ほかのデータを読み取りやすくするために周波数 0 を除いたグラフとしている。



上のグラフから、振幅スペクトルの値が他の値と比べて比較的大きい周波数 t を 6 個程度抽出する。また、抽出した周波数 t のときの振幅スペクトルの値と位相も抽出しておく。これらの数値から逆フーリエ変換を行い、元のデータに近似できているかどうか検証する。横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における加速度をとってグラフを作成すると下のようになる。また、逆フーリエ変換によって算出された時間 t と加速度との間の関数を $f(t)$ とすると、

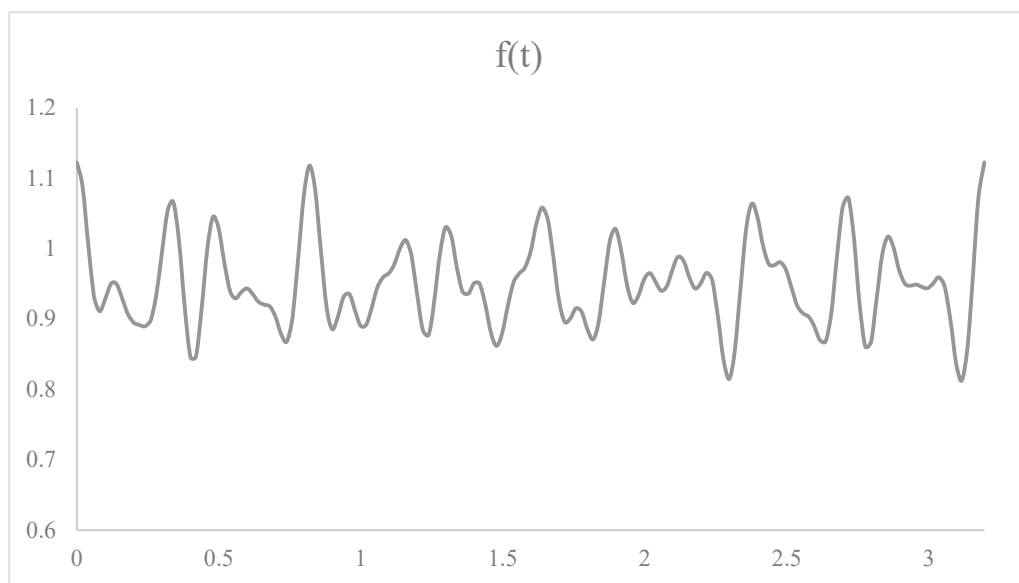
$$f(t) = 0.95 \cos 0$$

$$+ 0.034 \cos\left(\frac{8 \times 2\pi}{N}t - 0.43\right) + 0.050 \cos\left(\frac{12 \times 2\pi}{N}t - 0.63\right)$$

$$+ 0.033 \cos\left(\frac{19 \times 2\pi}{N}t + 0.16\right)$$

$$+ 0.039 \cos\left(\frac{20 \times 2\pi}{N}t - 0.026\right) + 0.032 \cos\left(\frac{27 \times 2\pi}{N}t + 0.31\right)$$

となる。(N はデータ数)

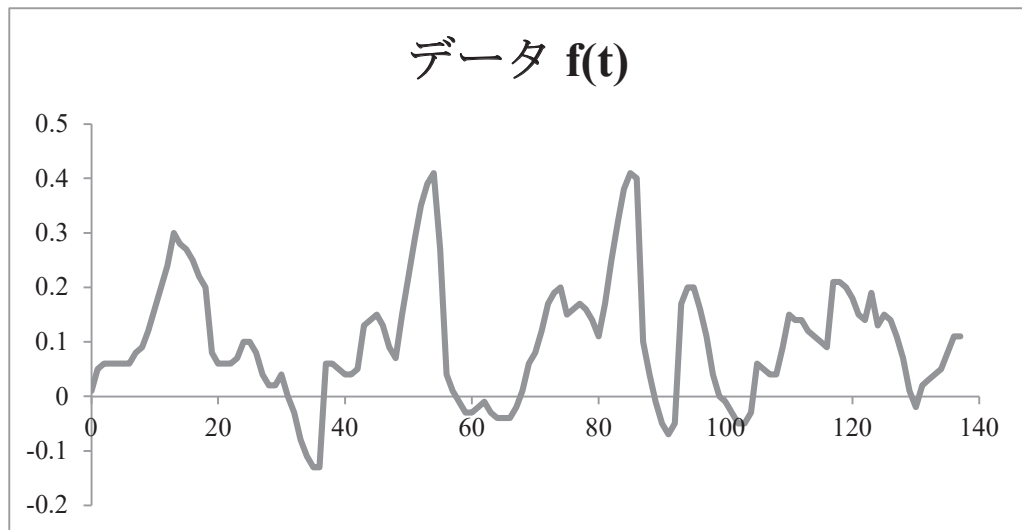


第2項 被験者 B の場合

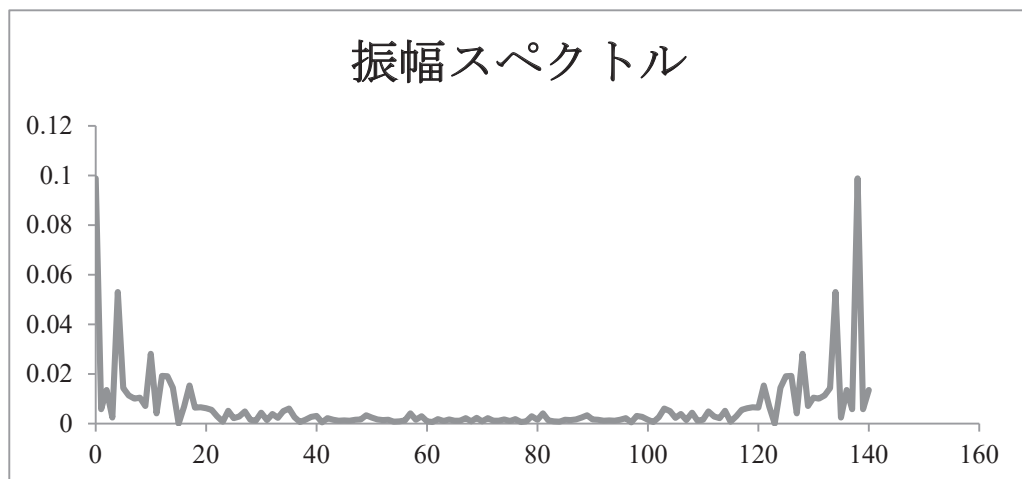
(1) 0 kg (おもりなし) のとき

(ア) X 成分

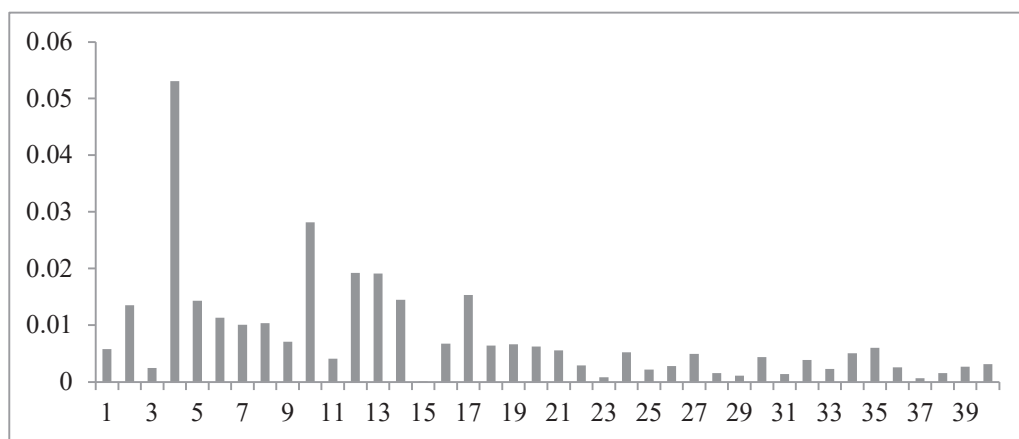
以下のグラフは、横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における加速度計の加速度の X 成分の値をとったものである。このグラフは時間 t の変化に対して歩く際の手元の加速度の X 成分の値が 4 周期の間に、どのように変化するかを表している。



上のデータに対して離散フーリエ変換とフーリエ級数展開を行った。以下のグラフは、横軸に周波数 t 、縦軸に周波数 t における振幅スペクトルの値をとったものである。このグラフは周波数 t における三角関数($\cos$)によって上データをどのくらい説明することができるのかを表している。



上のグラフでは周波数 t の全体としての変化はつかめるものの、周波数 t が大きい具体的な値が読み取れないため、周波数 t の範囲を 0 から 40 までに制限して縦軸には振幅スペクトルの値をとってグラフを再作成した。そのグラフを以下に示す。



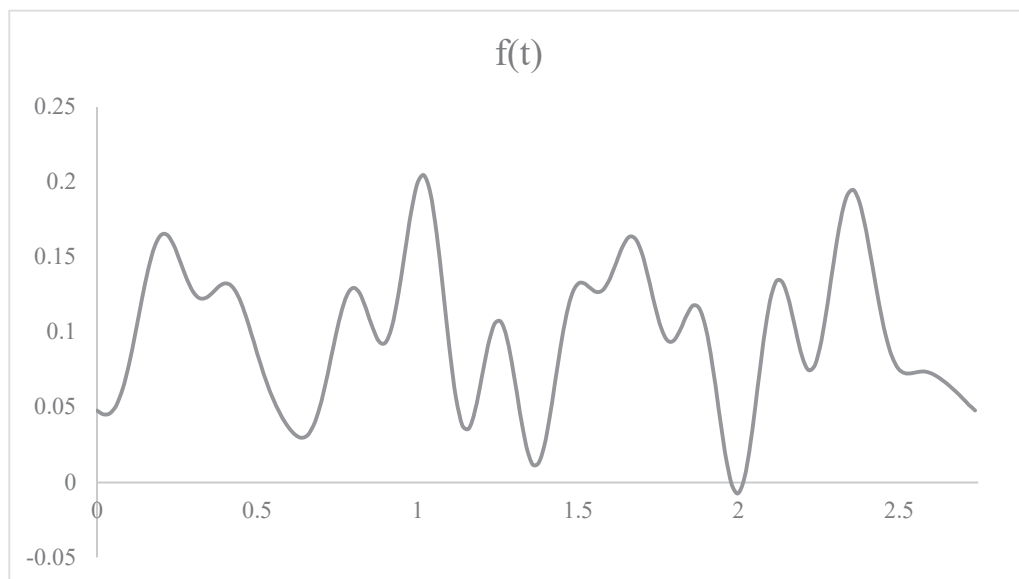
上のグラフから、振幅スペクトルの値が他の値と比べて比較的大きい周波数 t を 6 個程度抽出する。また、抽出した周波数 t のときの振幅スペクトルの値と位相も抽出しておく。これらの数値から逆フーリエ変換を行い、元のデータに近似できているかどうか検証する。横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における加速度をとってグラフを作成すると下のようになる。また、逆フーリエ変換によって算出された時間 t と加速度との間の関数を $f(t)$ とすると、

$$f(t) = 0.099 \cos 0$$

$$+ 0.053 \cos\left(\frac{4 \times 2\pi}{N}t - 2.6\right) + 0.028 \cos\left(\frac{10 \times 2\pi}{N}t + 1.9\right)$$

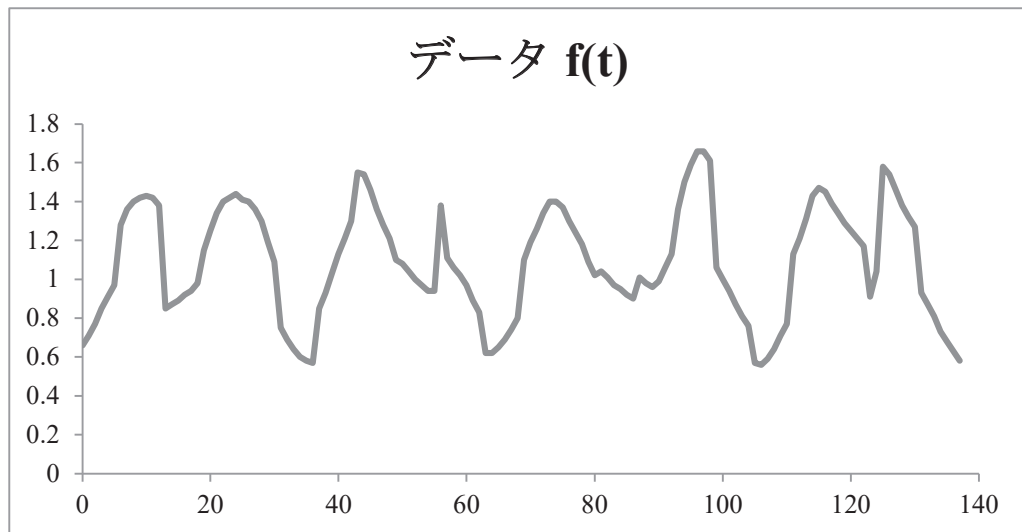
$$+ 0.019 \cos\left(\frac{12 \times 2\pi}{N}t - 2.5\right) + 0.019 \cos\left(\frac{13 \times 2\pi}{N}t + 0.23\right)$$

となる。(N はデータ数)

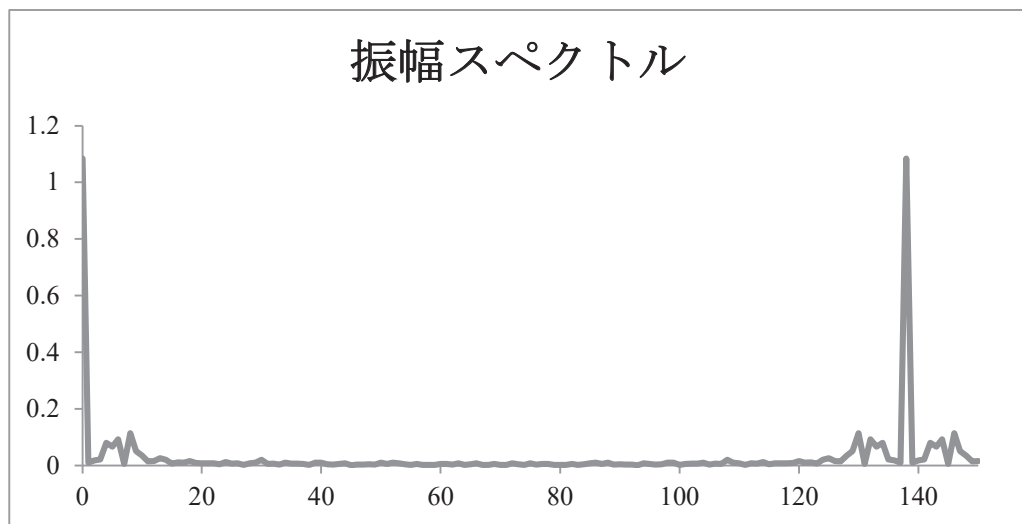


(イ) Y 成分

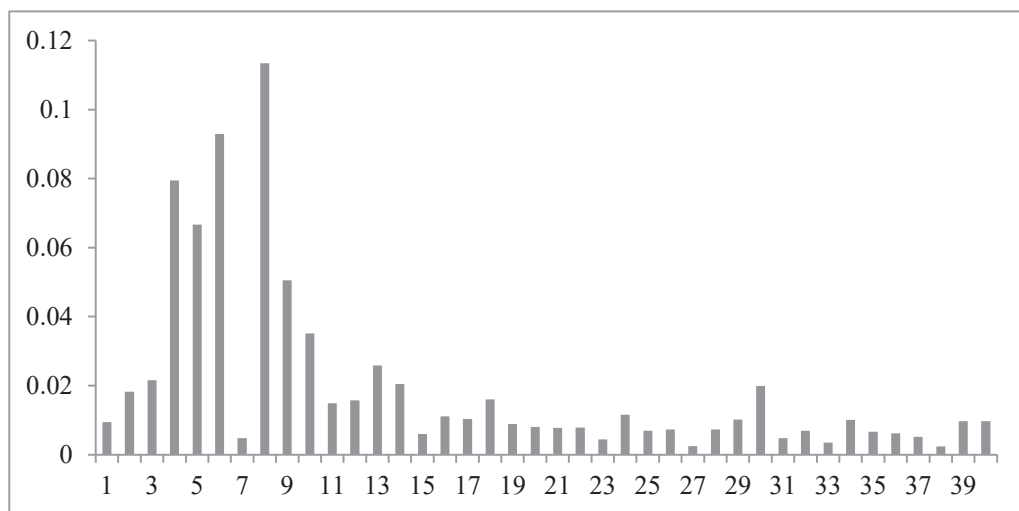
以下のグラフは、横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における加速度計の加速度の Y 成分の値をとったものである。このグラフは時間 t の変化に対して歩く際の手元の加速度の Y 成分の値が 4 周期の間に、どのように変化するかを表している。



上のデータに対して離散フーリエ変換とフーリエ級数展開を行った。以下のグラフは、横軸に周波数 t 、縦軸に周波数 t における振幅スペクトルの値をとったものである。このグラフは周波数 t における三角関数($\cos$)によって上データをどのくらい説明することができるのかを表している。



上のグラフでは周波数 t の全体としての変化はつかめるものの、周波数 t が大きい具体的な値が読み取れないため、周波数 t の範囲を 1 から 40 までに制限して縦軸には振幅スペクトルの値をとってグラフを再作成した。そのグラフを以下に示す。なお、周波数 0 の値が他の値に比べて大きいので、ほかのデータを読み取りやすくするために周波数 0 を除いたグラフとしている。



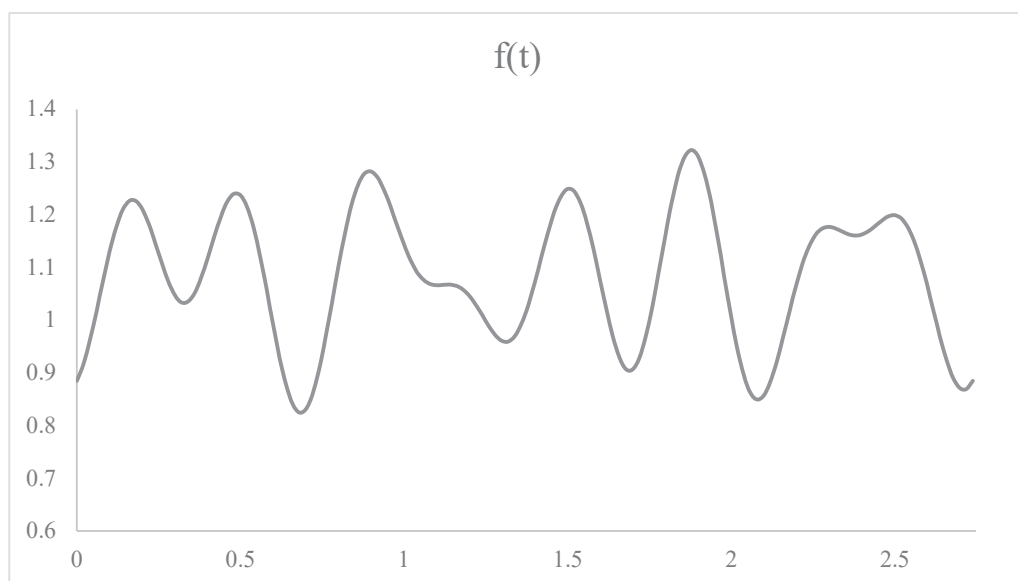
上のグラフから、振幅スペクトルの値が他の値と比べて比較的大きい周波数 t を 6 個程度抽出する。また、抽出した周波数 t のときの振幅スペクトルの値と位相も抽出しておく。これらの数値から逆フーリエ変換を行い、元のデータに近似できているかどうか検証する。横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における加速度をとってグラフを作成すると下のようになる。また、逆フーリエ変換によって算出された時間 t と加速度との間の関数を $f(t)$ とすると、

$$f(t) = 1.085 \cos 0$$

$$+ 0.080 \cos\left(\frac{4 \times 2\pi}{N} t - 3.0\right) + 0.066 \cos\left(\frac{5 \times 2\pi}{N} t + 2.8\right)$$

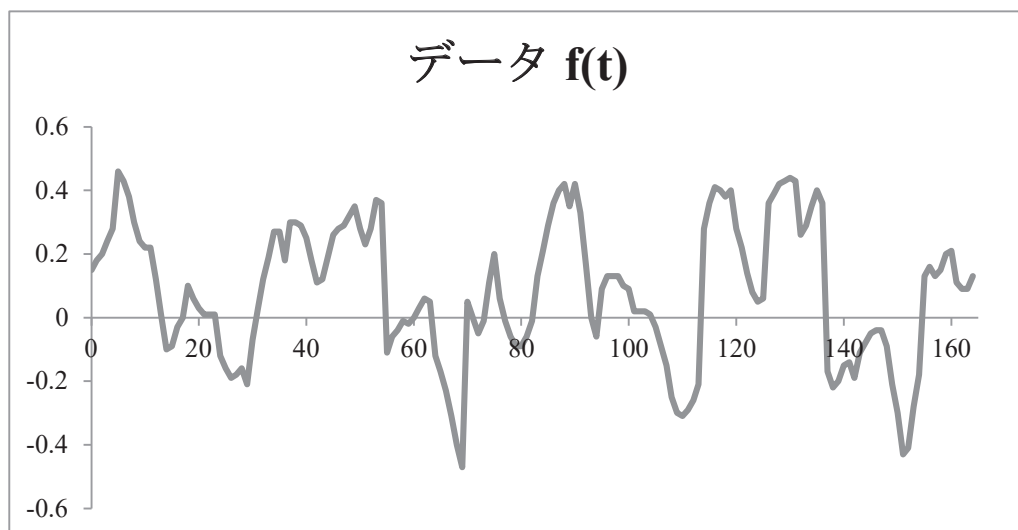
$$+ 0.093 \cos\left(\frac{6 \times 2\pi}{N} t - 1.0\right) + 0.11 \cos\left(\frac{8 \times 2\pi}{N} t - 3.0\right)$$

となる。(N はデータ数)

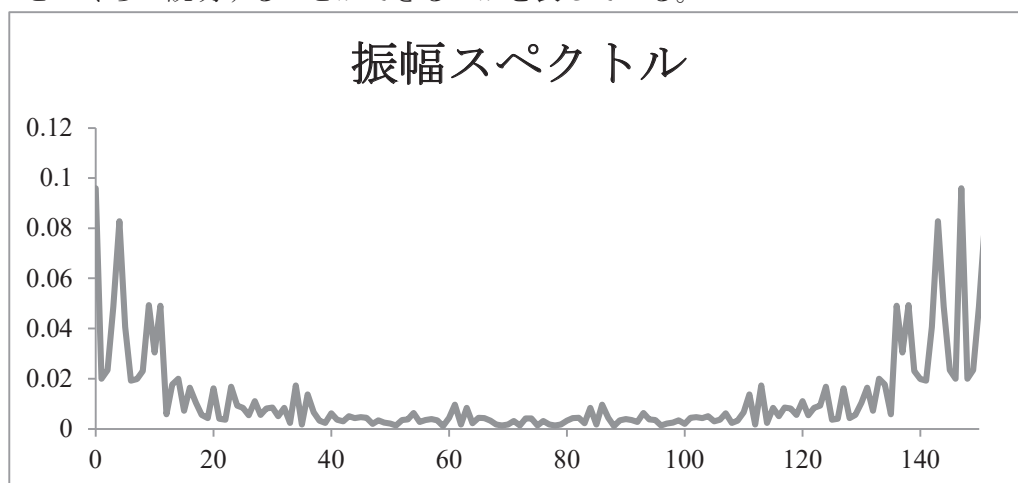


- (2) 1 kg のとき
(ア) X 成分

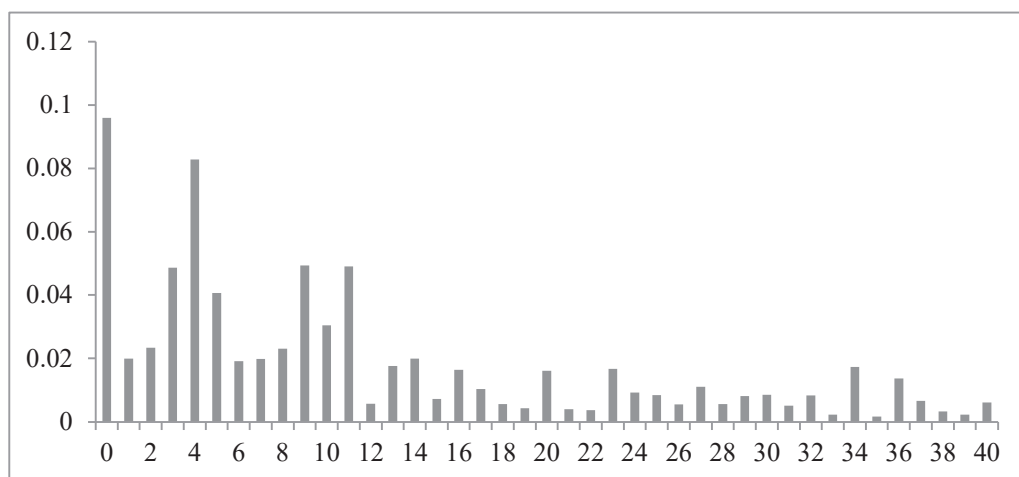
以下のグラフは、横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における加速度計の加速度の X 成分の値をとったものである。このグラフは時間 t の変化に対して 1 kg のおもりを持ち歩く際の手元の加速度の X 成分の値が 4 周期の間に、どのように変化するのかを表している。



上のデータに対して離散フーリエ変換とフーリエ級数展開を行った。以下のグラフは、横軸に周波数 t 、縦軸に周波数 t における振幅スペクトルの値をとったものである。このグラフは周波数 t における三角関数($\cos$)によって上データをどのくらい説明することができるのかを表している。



上のグラフでは周波数 t の全体としての変化はつかめるものの、周波数 t が大きい具体的な値が読み取れないため、周波数 t の範囲を 0 から 40 までに制限して縦軸には振幅スペクトルの値をとってグラフを再作成した。そのグラフを以下に示す。



上のグラフから、振幅スペクトルの値が他の値と比べて比較的大きい周波数 t を 6 個程度抽出する。また、抽出した周波数 t のときの振幅スペクトルの値と位相も抽出しておく。これらの数値から逆フーリエ変換を行い、元のデータに近似できているかどうか検証する。横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における加速度をとってグラフを作成すると下のようになる。また、逆フーリエ変換によって算出された時間 t と加速度との間の関数を $f(t)$ とすると、

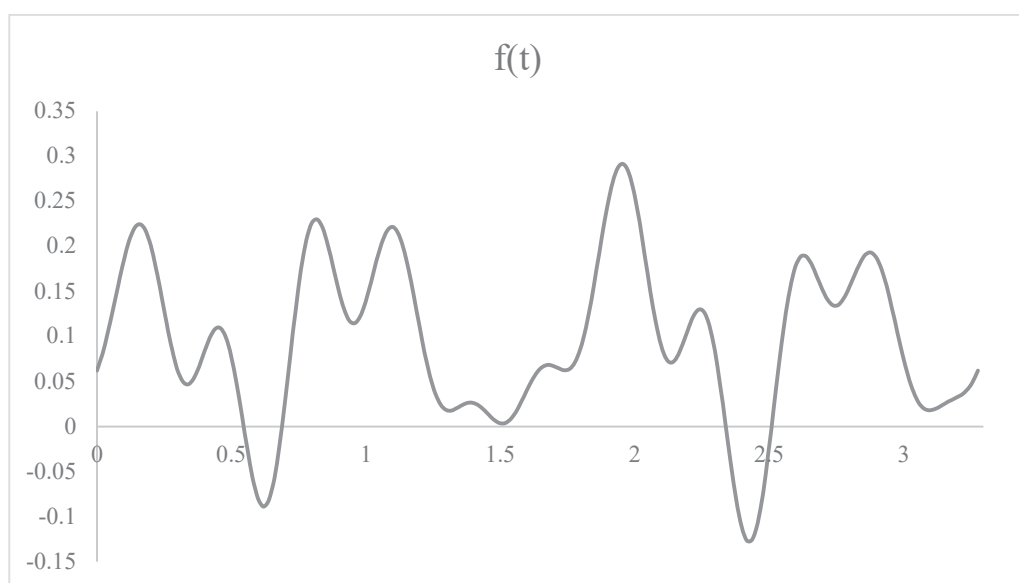
$$f(t) = 0.096 \cos 0$$

$$+ 0.049 \cos\left(\frac{3 \times 2\pi}{N}t + 1.1\right) + 0.083 \cos\left(\frac{4 \times 2\pi}{N}t - 2.0\right)$$

$$+ 0.040 \cos\left(\frac{5 \times 2\pi}{N}t - 1.5\right)$$

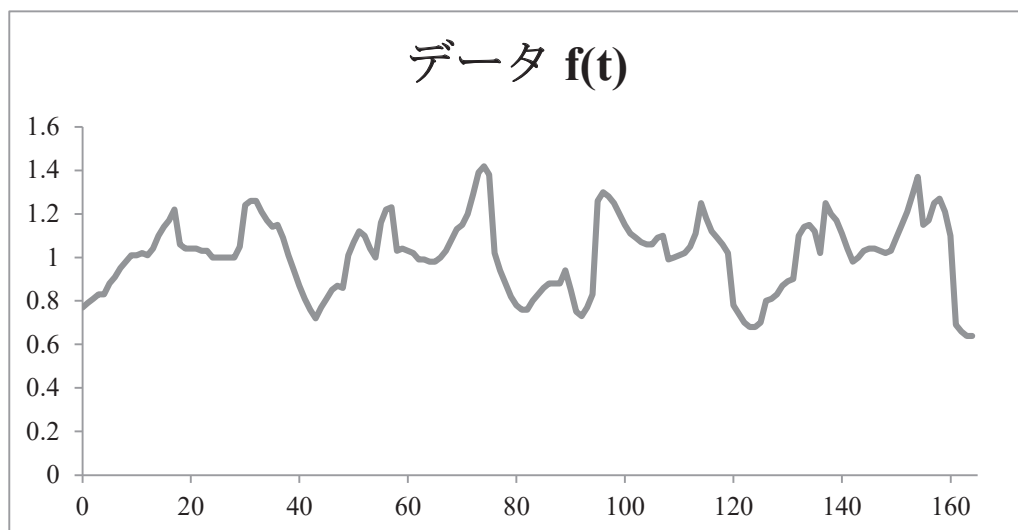
$$+ 0.049 \cos\left(\frac{9 \times 2\pi}{N}t - 1.4\right) + 0.049 \cos\left(\frac{11 \times 2\pi}{N}t + 2.3\right)$$

となる。(N はデータ数)

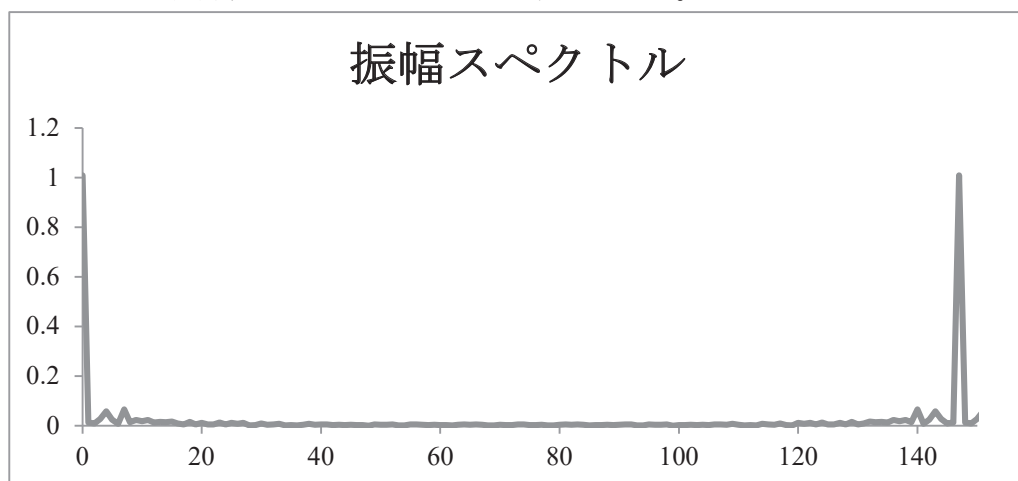


(イ) Y 成分

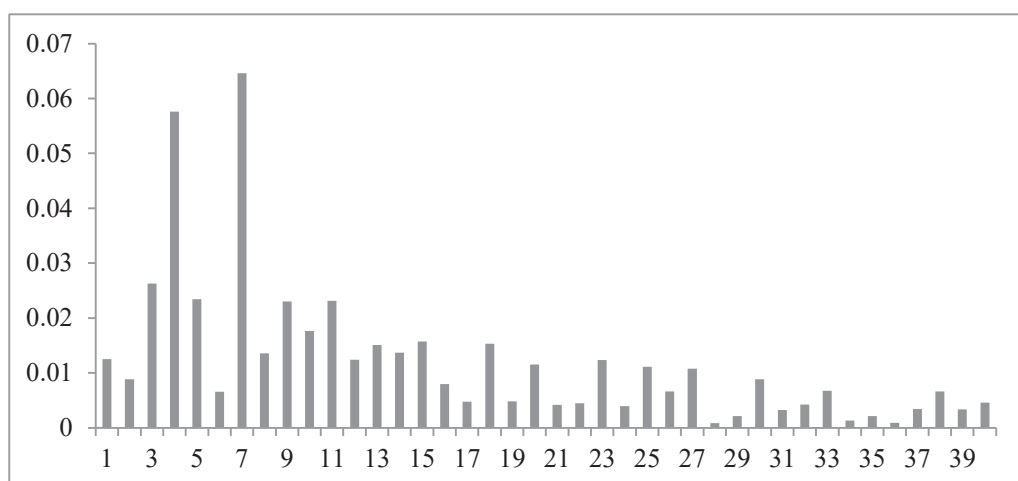
以下のグラフは、横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における加速度計の加速度の Y 成分の値をとったものである。このグラフは時間 t の変化に対して 1 kg のおもりを持ち歩く際の手元の加速度の Y 成分の値が 4 周期の間に、どのように変化するかを表している。



上のデータに対して離散フーリエ変換とフーリエ級数展開を行った。以下のグラフは、横軸に周波数 t 、縦軸に周波数 t における振幅スペクトルの値をとったものである。このグラフは周波数 t における三角関数(cos)によって上データをどのくらい説明することができるのかを表している。



上のグラフでは周波数 t の全体としての変化はつかめるものの、周波数 t が大きい具体的な値が読み取れないため、周波数 t の範囲を 1 から 40 までに制限して縦軸には振幅スペクトルの値をとってグラフを再作成した。そのグラフを以下に示す。なお、周波数 0 の値が他の値に比べて大きいので、ほかのデータを読み取りやすくするために周波数 0 を除いたグラフとしている。

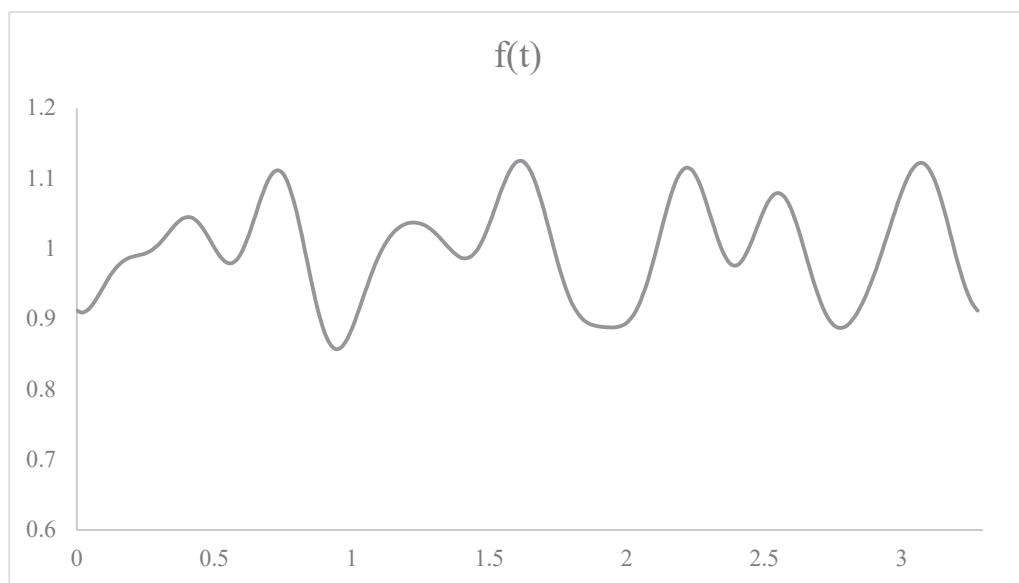


上のグラフから、振幅スペクトルの値が他の値と比べて比較的大きい周波数 t を 6 個程度抽出する。また、抽出した周波数 t のときの振幅スペクトルの値と位相も抽出しておく。これらの数値から逆フーリエ変換を行い、元のデータに近似できているかどうか検証する。横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における加速度をとってグラフを作成すると下のようになる。また、逆フーリエ変換によって算出された時間 t と加速度との間の関数を $f(t)$ とすると、

$$f(t) = 1.00 \cos 0$$

$$\begin{aligned}
 &+ 0.026 \cos\left(\frac{3 \times 2\pi}{N}t - 2.1\right) + 0.058 \cos\left(\frac{4 \times 2\pi}{N}t + 1.3\right) \\
 &+ 0.023 \cos\left(\frac{5 \times 2\pi}{N}t + 2.5\right) \\
 &+ 0.065 \cos\left(\frac{7 \times 2\pi}{N}t + 2.8\right) \\
 &+ 0.023 \cos\left(\frac{9 \times 2\pi}{N}t - 1.0\right) + 0.023 \cos\left(\frac{11 \times 2\pi}{N}t - 3.0\right)
 \end{aligned}$$

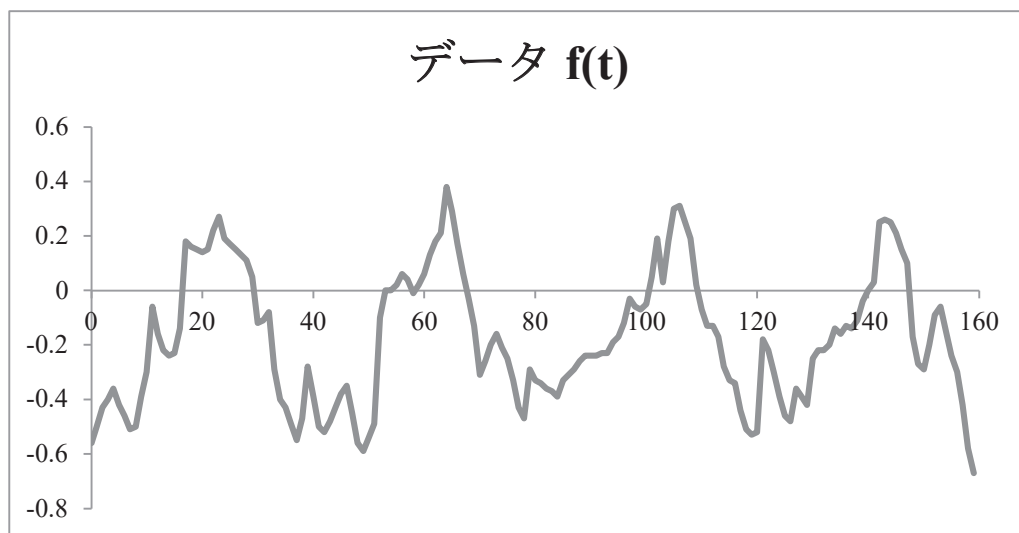
となる。(N はデータ数)



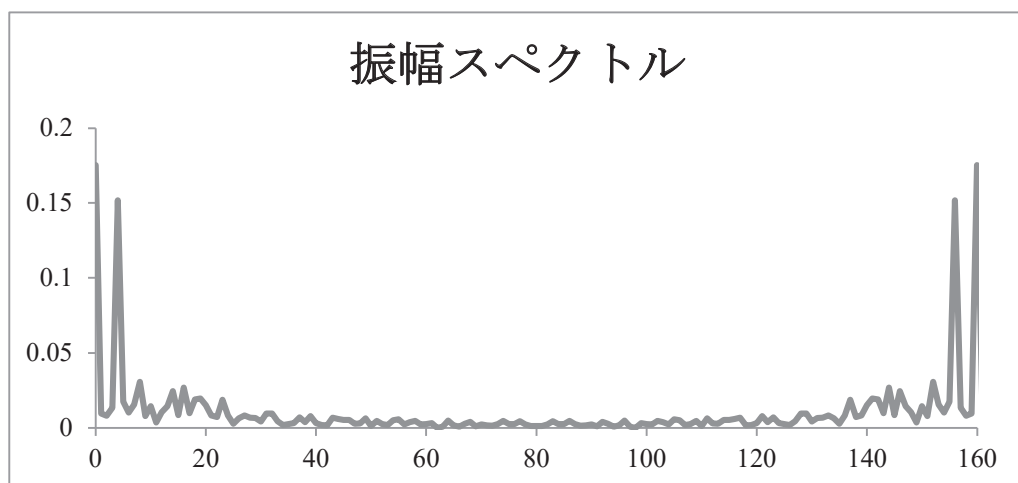
(3) 5 kg のとき

(ア) X 成分

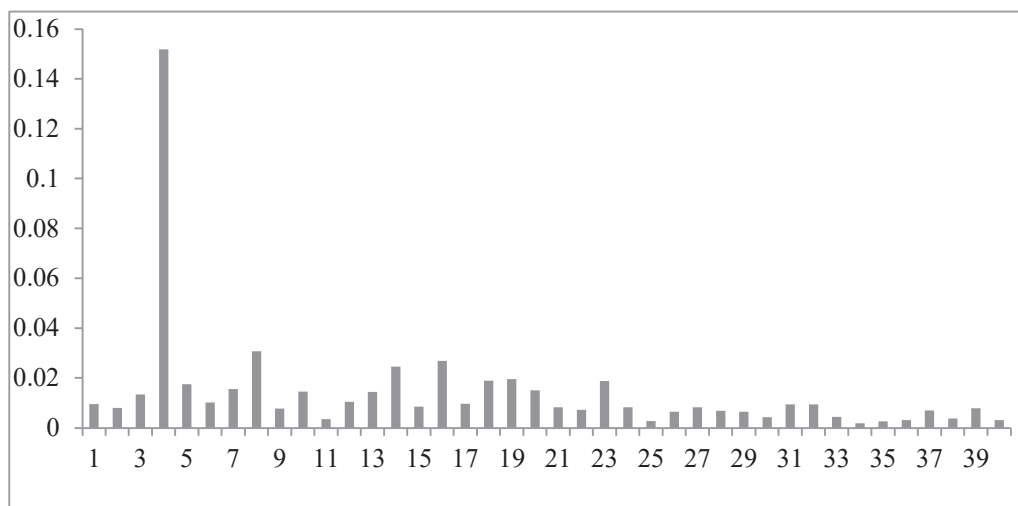
以下のグラフは、横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における加速度計の加速度の X 成分の値をとったものである。このグラフは時間 t の変化に対して 5 kg のおもりを持ち歩く際の手元の加速度の X 成分の値が 4 周期の間に、どのように変化するのかを表している。



上のデータに対して離散フーリエ変換とフーリエ級数展開を行った。以下のグラフは、横軸に周波数 t 、縦軸に周波数 t における振幅スペクトルの値をとったものである。このグラフは周波数 t における三角関数(cos)によって上データをどのくらい説明することができるのかを表している。



上のグラフでは周波数 t の全体としての変化はつかめるものの、周波数 t が大きい具体的な値が読み取れないため、周波数 t の範囲を 0 から 40 までに制限して縦軸には振幅スペクトルの値をとってグラフを再作成した。そのグラフを以下に示す。



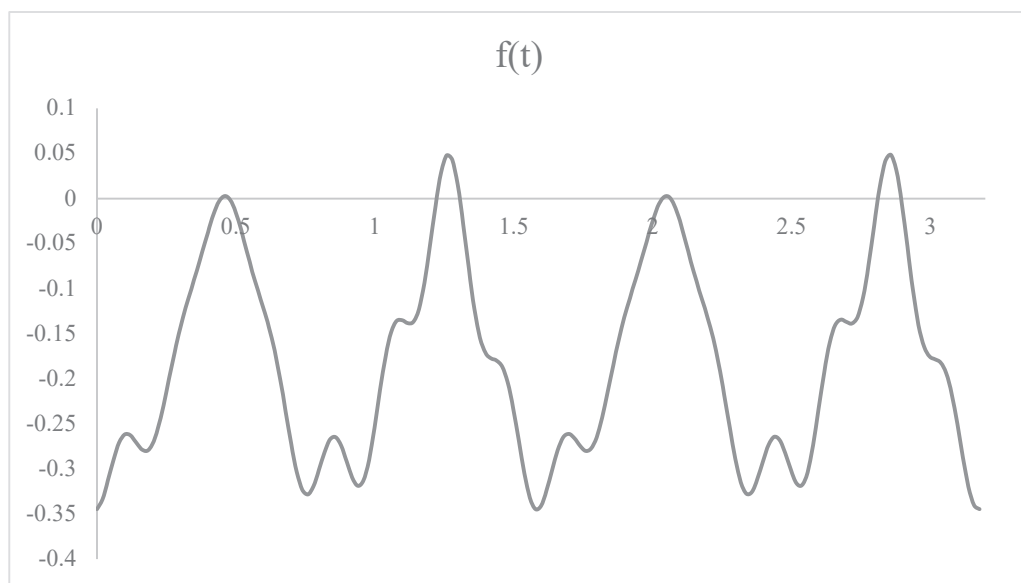
上のグラフから、振幅スペクトルの値が他の値と比べて比較的大きい周波数 t を 6 個程度抽出する。また、抽出した周波数 t のときの振幅スペクトルの値と位相も抽出しておく。これらの数値から逆フーリエ変換を行い、元のデータに近似できているかどうか検証する。横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における加速度をとってグラフを作成すると下のようになる。また、逆フーリエ変換によって算出された時間 t と加速度との間の関数を $f(t)$ とすると、

$$f(t) = 0.18 \cos \pi$$

$$+ 0.15 \cos\left(\frac{4 \times 2\pi}{N}t + 2.7\right) + 0.030 \cos\left(\frac{8 \times 2\pi}{N}t - 1.3\right)$$

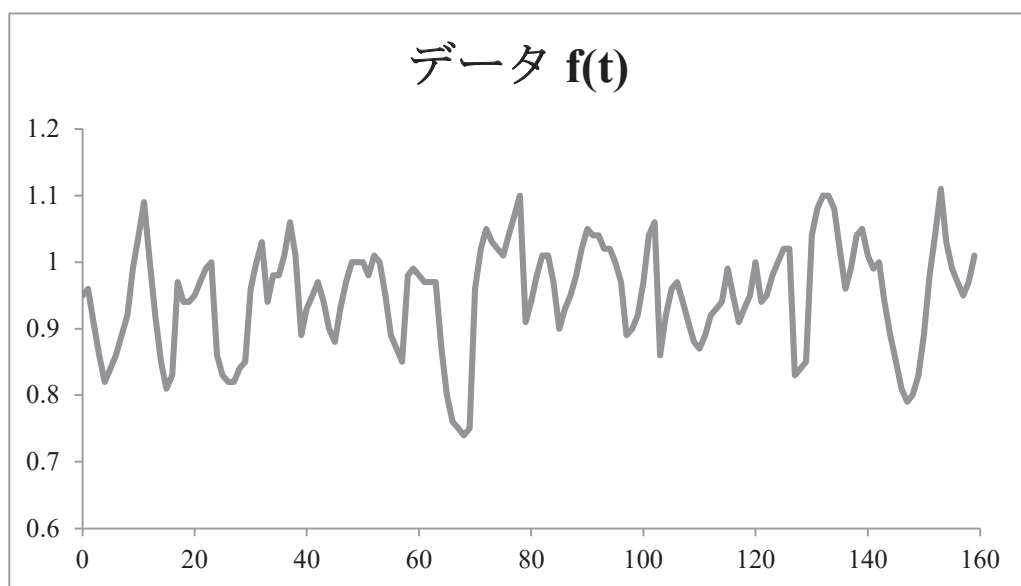
$$+ 0.024 \cos\left(\frac{14 \times 2\pi}{N}t + 2.5\right) + 0.027 \cos\left(\frac{16 \times 2\pi}{N}t - 2.3\right)$$

となる。(N はデータ数)

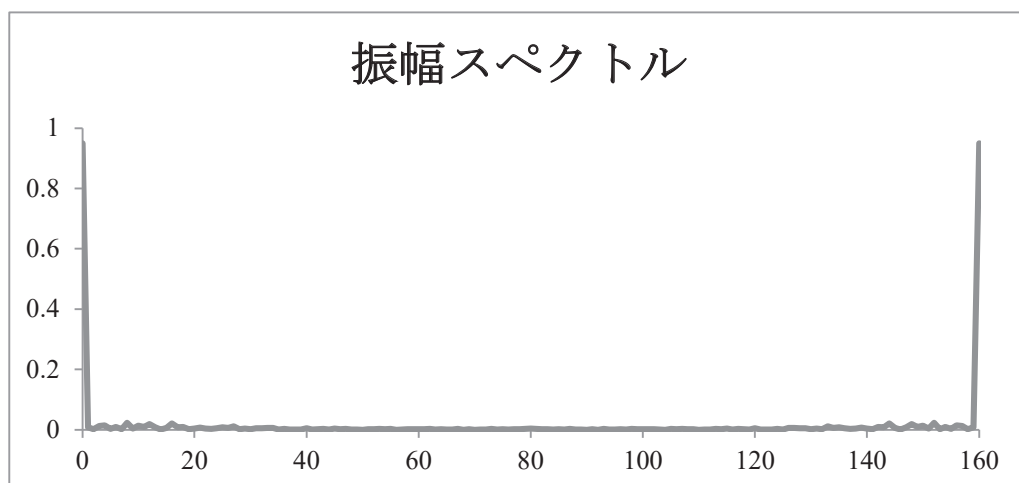


(イ) Y 成分

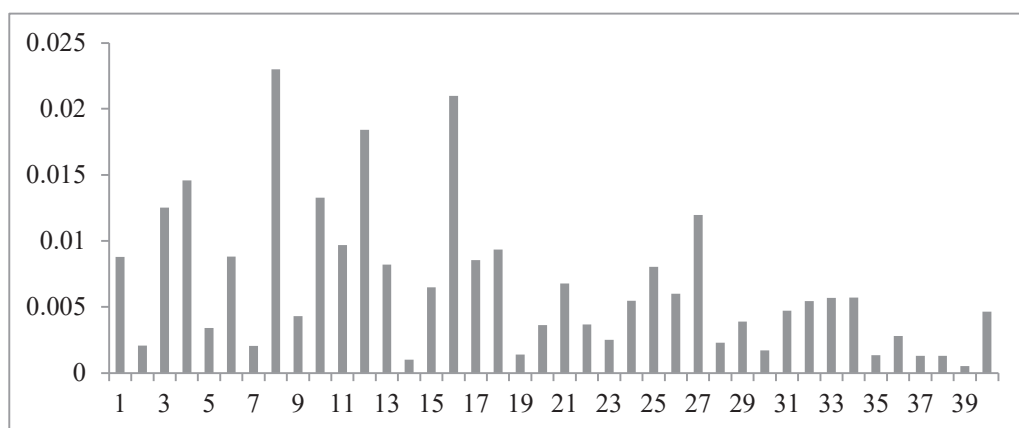
以下のグラフは、横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における加速度計の加速度の Y 成分の値をとったものである。このグラフは時間 t の変化に対して 5 kg のおもりを持ち歩く際の手元の加速度の Y 成分の値が 4 周期の間に、どのように変化するかを表している。



上のデータに対して離散フーリエ変換とフーリエ級数展開を行った。以下のグラフは、横軸に周波数 t 、縦軸に周波数 t における振幅スペクトルの値をとったものである。このグラフは周波数 t における三角関数($\cos$)によって上データをどのくらい説明することができるのかを表している。



上のグラフでは周波数 t の全体としての変化はつかめるものの、周波数 t が大きい具体的な値が読み取れないため、周波数 t の範囲を 1 から 40 までに制限して縦軸には振幅スペクトルの値をとってグラフを再作成した。そのグラフを以下に示す。なお、周波数 0 の値が他の値に比べて大きいので、ほかのデータを読み取りやすくするために周波数 0 を除いたグラフとしている。

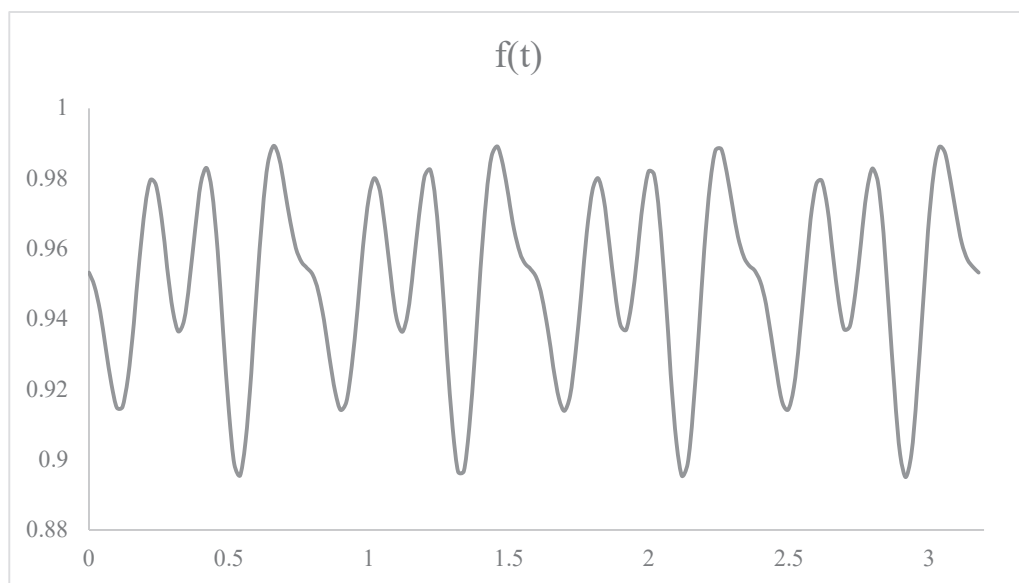


上のグラフから、振幅スペクトルの値が他の値と比べて比較的大きい周波数 t を 6 個程度抽出する。また、抽出した周波数 t のときの振幅スペクトルの値と位相も抽出しておく。これらの数値から逆フーリエ変換を行い、元のデータに近似できているかどうか検証する。横軸に時間 t 、縦軸に時刻 t における加速度をとってグラフを作成すると下のようになる。また、逆フーリエ変換によって算出された時間 t と加速度との間の関数を $f(t)$ とすると、

$$f(t) = 0.95 \cos 0$$

$$+ 0.023 \cos\left(\frac{8 \times 2\pi}{N}t + 1.4\right) + 0.018 \cos\left(\frac{12 \times 2\pi}{N}t + 2.3\right) \\ + 0.021 \cos\left(\frac{16 \times 2\pi}{N}t - 1.0\right)$$

となる。(N はデータ数)

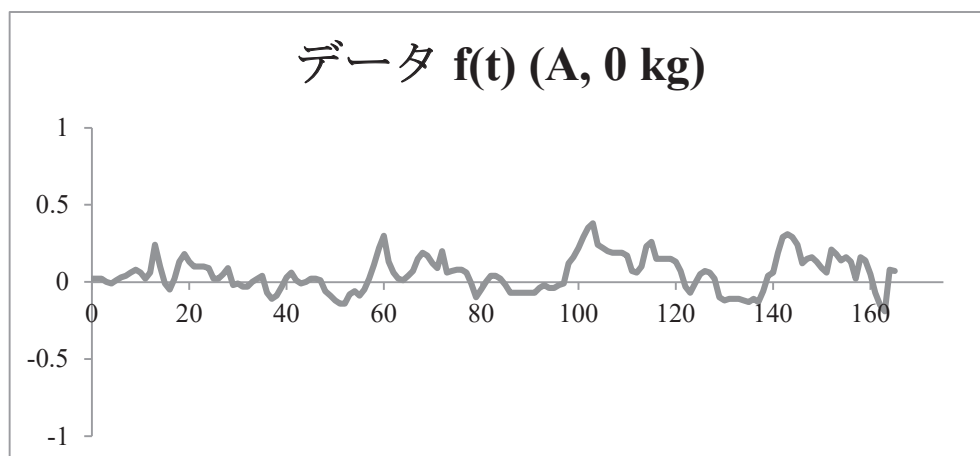


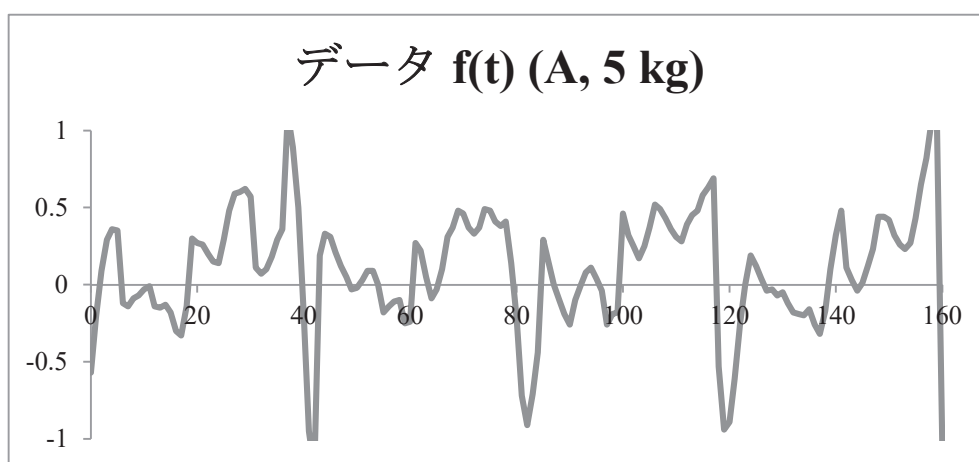
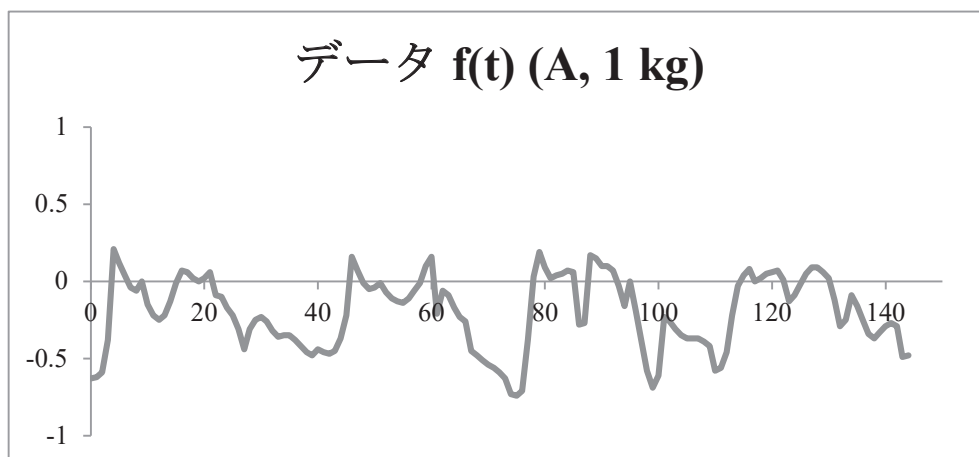
これらのグラフから大きく分けて以下の6点について考察する。

- (i) X成分の加速度に特に注目する理由
- (ii) 振幅の大きさについて
- (iii) 個人差について
- (iv) 振幅スペクトルについて
- (v) 持ち歩く際の腕の振り方について
- (vi) 誤差について

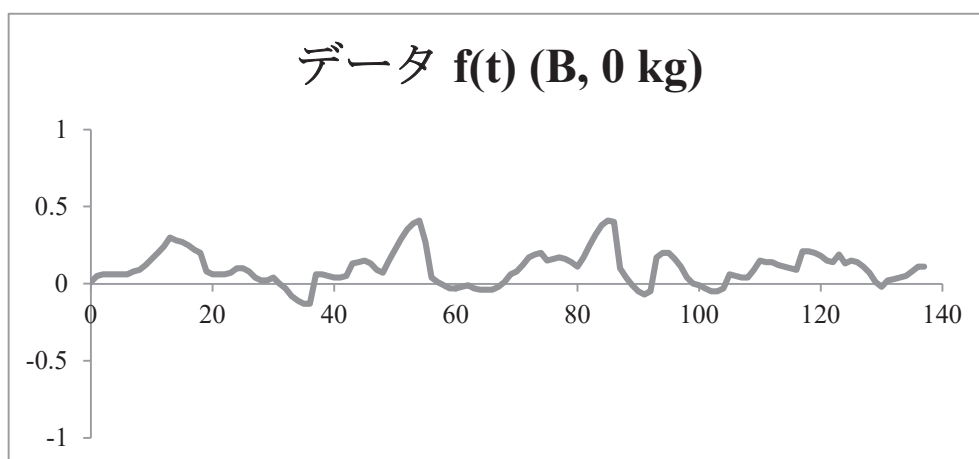
また、グラフの軸の値を適宜調整する。X成分の加速度に関するものを調整して比較しやすくしたものを以下にまとめて示す。

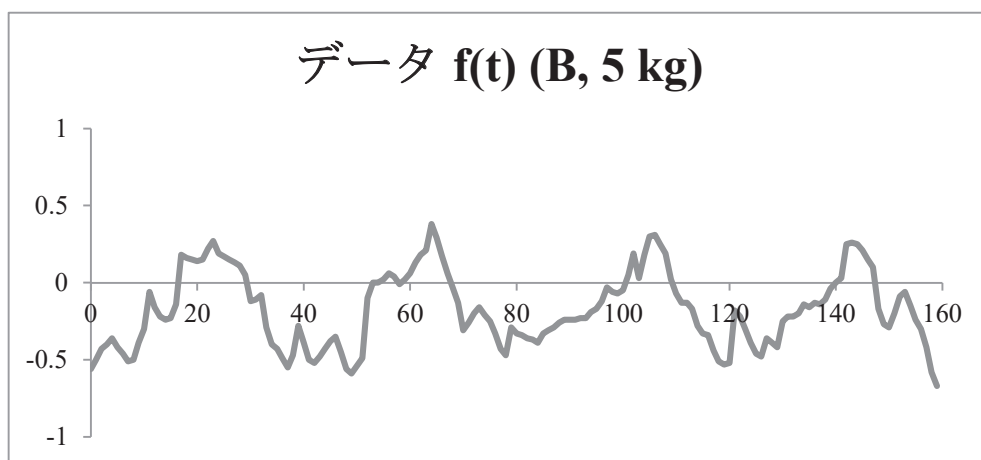
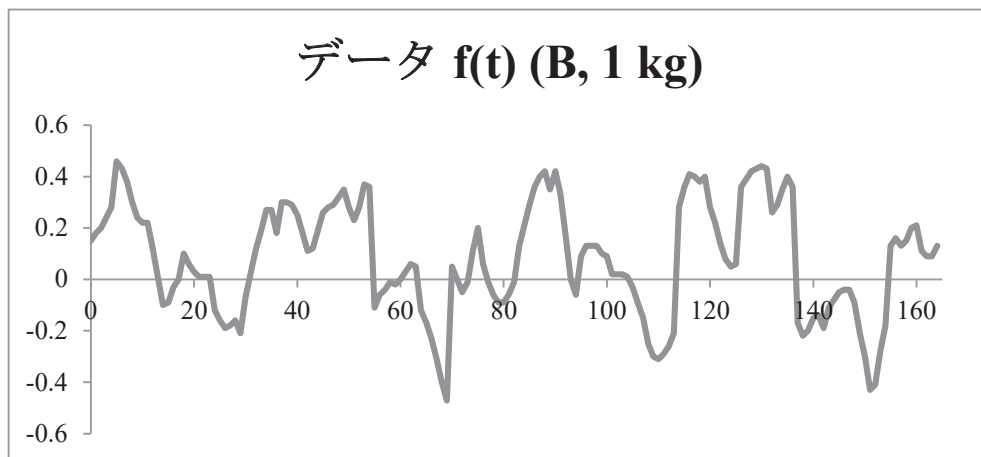
(a) 被験者 A $f(t)$



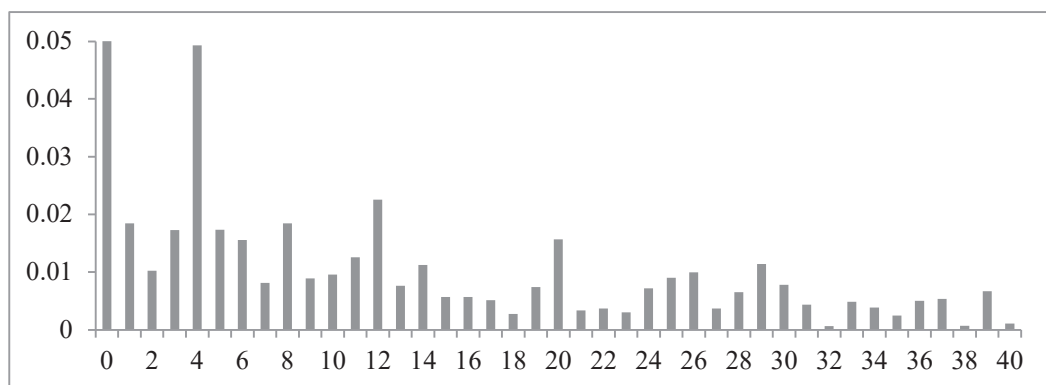


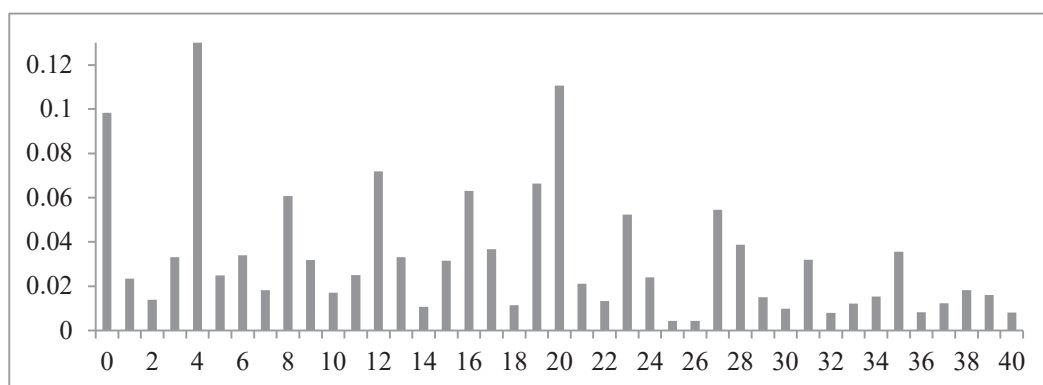
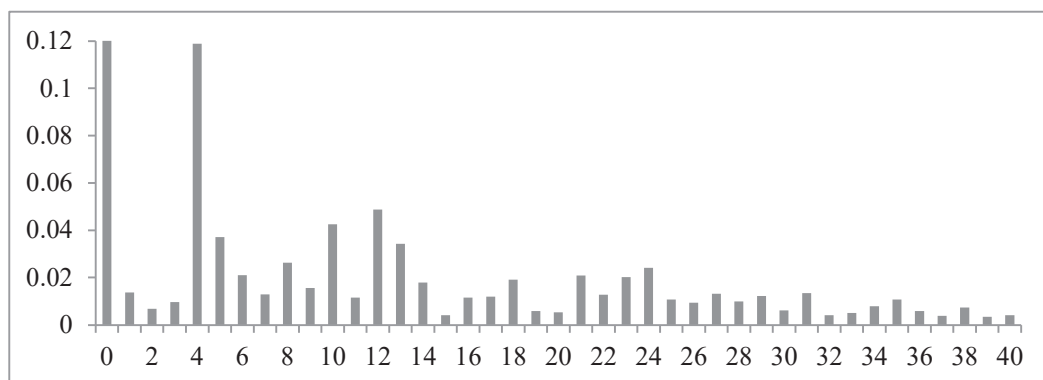
(b) 被験者 B $f(t)$



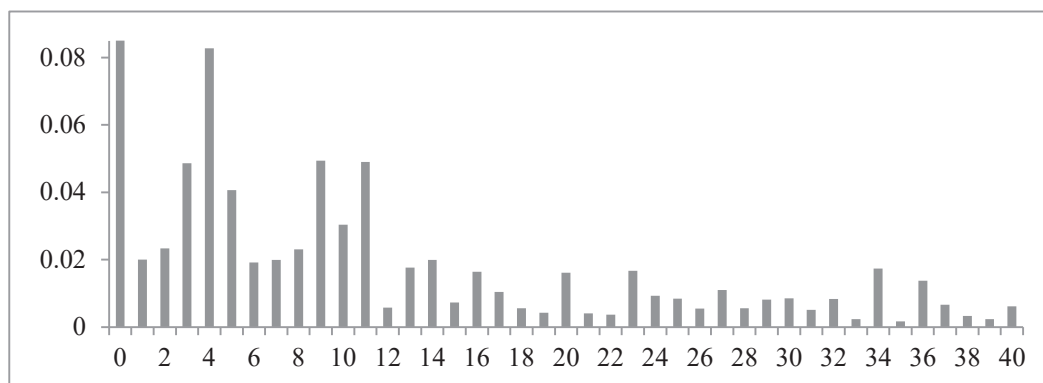
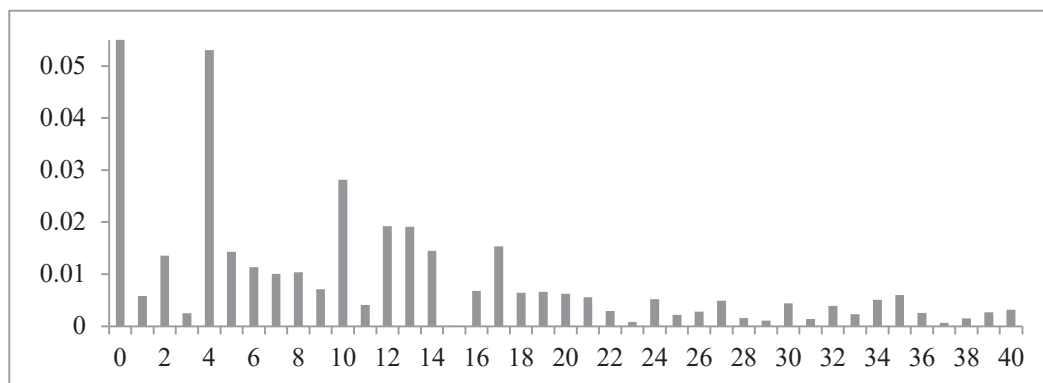


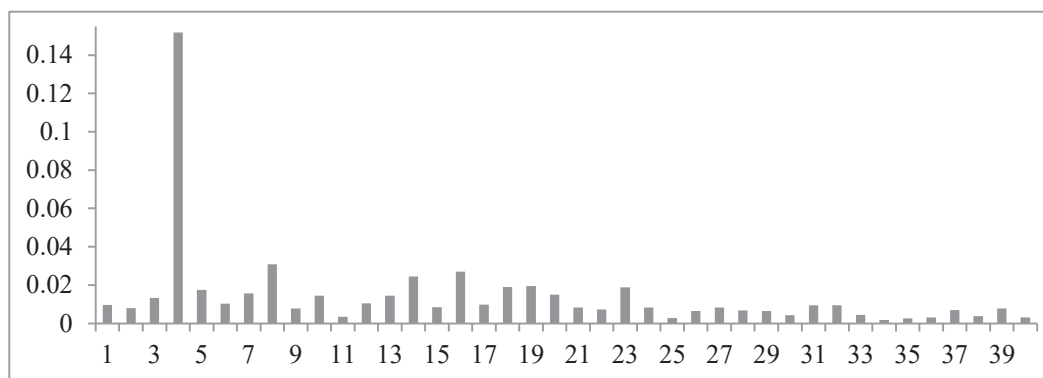
(c) 被験者 A 振幅スペクトル





(d) 被験者 B 振幅スペクトル





(i) X成分の加速度に特に注目する理由

これから行う今回の考察では、特にX成分の加速度に注目して行う。

それぞれの加速度のY成分に注目すると、ほとんどの場合においてフーリエ変換・フーリエ級数展開後の主要な周波数 t の中に8という数が登場することが分かる。さらには周波数 t が8のときの振幅の大きさが他の主要な周波数に比べたとしても周波数8の方が大きい場合が多い。この周波数8という数字は腕を4周期振った際に、4周期を8で割った周期(腕を振る0.5周期)で変化しているという意味を表す。これは単振り子におけるおもりの運動の鉛直成分の符号がおもりの運動周期の半分で規則的に変化することを考慮に入れると、ある意味自明であるともいえると考えられる。

ここで慣性力を考える。X成分に比べて規則的なふるまいをするY成分の加速度は慣性力についてもX成分に比べて規則的なふるまいをすると考えられる。したがって、レジ袋の中身が傾く原因は加速度のX成分にある可能性が高いと考えた。これが今回の考察でX成分の加速度に特に注目する理由である。

(ii) 振幅の大きさについて

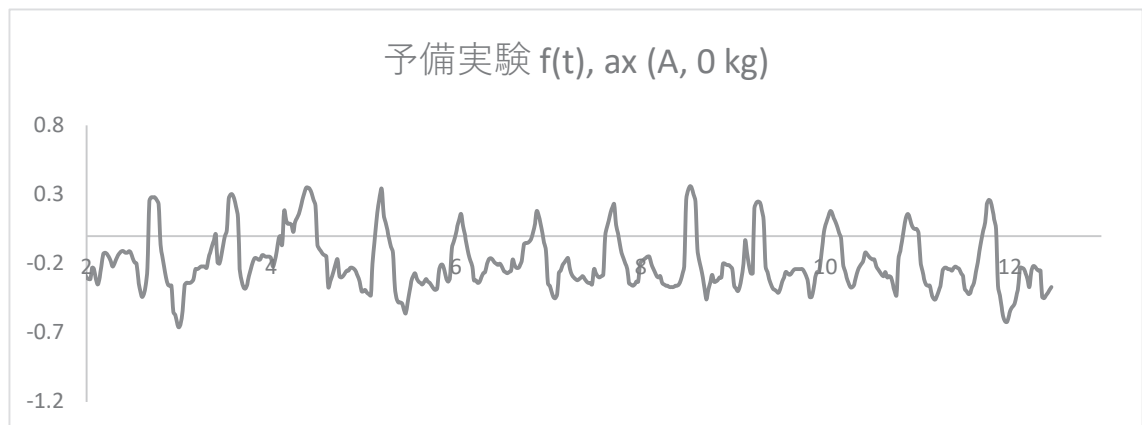
振幅の大きさを条件ごとに比較する。(a), (b)を用いて比較すると、おもりの重さが大きくなればなるほど、振幅の大きさが大きくなっていることが分かる。このことから、振幅の大きさとおもりの重さとの間には正の相関の関係があると考えられる。

このことがなぜ起きているのかについて考察する。ここからはあくまでも仮説ではあるが、加速度を記録する際に被験者が無意識のうちに、なっているメトロノームのテンポに手を振る周期を合わせようと腕がおもりや加速度計に力を加えたためではないかと考えた。おもりの重さが大きくなればなるほど、人間の力でおもりを動かすのに必要な力が大きくなる。

$$\text{運動方程式 } m\vec{a} = \vec{F}$$

の観点で考えると、加速度 $\vec{a}$ を大きくすることでおもりを動かす力 $\vec{F}$ を大きくすることができると考えられる。このことはこの実験を行う際に事前に行った予備実験からも見て取ることができる。以下のグラフは予備実験での被験者Aの0 kgにおける実験データである。予備実験は、本実験とはテンポの指定がないということ以外、まったく同じ条件で行った。

(詳細な予備実験の結果は、付録Dを参照)



予備実験のグラフは(a)のと比べて1周期の内部の波形が全体的に整っており、テンポの指定がない分、何かに合わせるという必要性がない。よって、上記の仮説を認めると、手を振る周期を調整しようとしなかったために全体的に規則的で整った見た目のグラフが現れたのではないかと説明することができる。

(iii) 個人差について

(a)と(b)とを被験者以外の条件を同じ条件で比較すると、加速度の波形がかなり異なることが見て取れる。個人差が多い要因は(v)で後述するが、これにより人によって中身が傾く原因が異なる可能性があることが示唆される。

(iv) 振幅スペクトルについて

次に、(c)、(d)における周波数 t が大きい(20~40程度)の部分について考える。ここでおもりの重さと周波数 t の大きい部分のスペクトル値とを比較する。すべての条件において正しいとは言いきれないが、多くの場合、おもりの重さが大きくなればなるほど、周波数 t の大きい部分のスペクトルの値が大きくなっていることが分かる。つまり、おもりの重さと比較的高周波数の場合のスペクトルの値との間に正の相関があると考えられる。

このことがなぜ起こるのかについては、(i)で言及した腕による周期の調整がたびたび発生することによって一時的におもりや加速度計に加速度が加えられた痕跡なのではないかと考える。

(v) 持ち歩く際の腕の振り方について

(d)について考える。(d)の0 kg, 1 kgのときのスペクトルと5 kgのときのスペクトルとで分けて比較する。すると、0 kg, 1 kgの時に比べて5 kgの時は周波数 t が4のスペクトルがほかの周波数に比べて値がかなり大きいことが分かる。このことは、1つの周波数4におけるスペクトルのみで、5 kgにおける加速度を表すことが十分可能であることを表している。つまり、5 kgの時に限って振り子にかなり近い運動をしていたことが示唆される。

このことから、人が何か質量のあるものを手に持ち歩くときの腕の振り方には大きく分けて2種類の振り方があると推察される。

① $(ma \cos \theta) < (mg \sin \theta)$ のとき

ものにはたらく慣性力がものの重力よりも小さいとき、慣性力によりひじを曲げようとするよりも重力によってひじを伸ばすことの方が起こりやすいと考えられる。このとき、ひじが伸びて腕が一直線になるため、振り子に近い運動になると推察される。

② $(ma \cos \theta) > (mg \sin \theta)$ のとき

ものにはたらく慣性力がものの重力よりも小さいとき、重力によってひじを伸ばすことの方よりも慣性力によりひじを曲げようとするの方が起こりやすいと考えられる。このとき、ひじが曲がって腕が一直線にならず、複雑な運動になると推察される。

これらの仮説が正しいものだとすると、(d)の5 kg については、①によりひじが伸びて振り子に近い運動になったのではないかと説明できる。また、この仮説により同じ条件であっても振り方によって①になるのか②になるのかが変わるため、個人差が発生している可能性もあると考える。

第 6 章 結論

第 1 節 まとめ

レジ袋の中身が傾く現象については、腕を規則的に動かすために小刻みに腕に力を加えている効果、肘の可動域の端に達したときに慣性力が大きくなる効果の影響が大きいことや、弁当箱には臨界角が存在し、臨界角を超えて弁当箱が傾くことがあることが主な原因であることが分かった。また、人がものを持ち運ぶ際の運動については、袋の内容物に働く重力が大きいためひじが伸びてしまうタイプと袋の内容物に慣性力が大きいためひじが曲がってしまうタイプの 2 種類の運動に分けられるということも分かった。

第 2 節 今後の展望・課題

第 3 章の考察でも述べたが、理想弁当に関する計算は容易なものではなく、本研究においては、一部の傾き θ の範囲に絞って分析を行った。今後の研究によって、理想弁当に関する理解が深まることを期待したい。

また、第 4 章でも述べたが、ものを持ち運ぶ際の手元の加速度が人によって異なっており、原因が個人の間における差異である可能性もあり得ることが本研究における課題である。

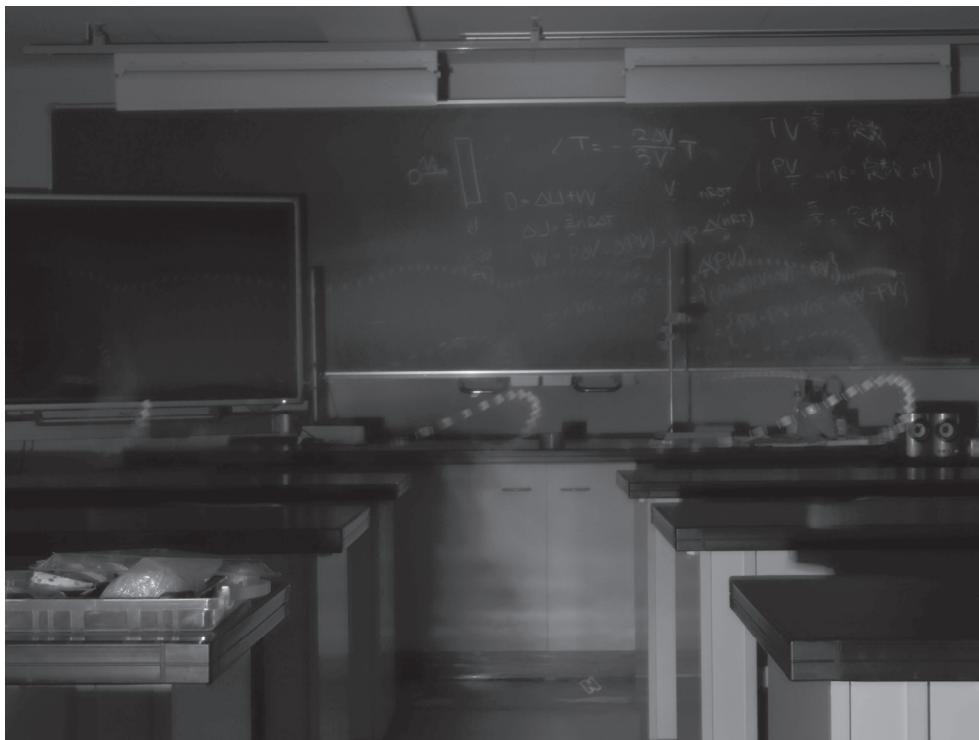
今後は本研究で特定した原因をもとに、レジ袋の中身が傾かないようにする解決策を考案し、考案した解決策が本当にレジ袋の中身が傾こうとすることを軽減するような効果があるのかどうかについて検証を行う予定である。

謝辞

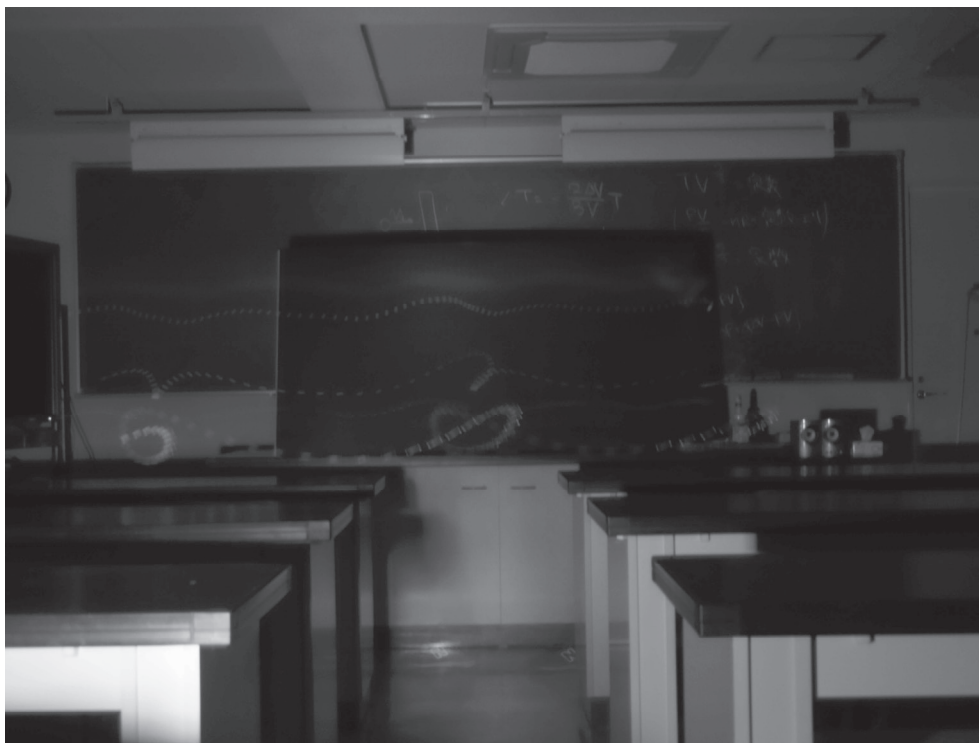
指導教員の竹村実成先生は、自分が研究中に悩んでいるときにアドバイスしてくださったり、実験の補助をしてくださったり、研究を進めるにあたって必要となった。フーリエ変換やフーリエ級数展開などのやり方だけでなく、その数学的背景などの知識のレクチャーをしてくださったりと、研究に関する様々なことのサポートをしていただきました。また、池田達哉先生には実験器具の使い方や実験に対するアドバイスをしていただきました。同級生の富田真人さんや諸井千毅さん（2人とも本学6年生）には、物理シミュレーションコード作成の過程においてPythonの指導をしていただきました。以上の方々に心より御礼申し上げます。さらに、後輩の藤野大基さん（本学5年生）には理想弁当の角度を変化させた際に弁当の重心が描く軌跡について、彼自身の善意により、レポートを作成いただきました。私一人では絶対に実現不可能であった理想弁当に関する研究を進められたのは正しく彼によるところが大きく、大変感謝しております。また、本研究は国立研究開発法人科学技術振興機構の支援を受けて行われました。

付録 A ストロボ撮影で得られた画像

第2章で述べたストロボ撮影で得られた画像のすべてを以下に示す。



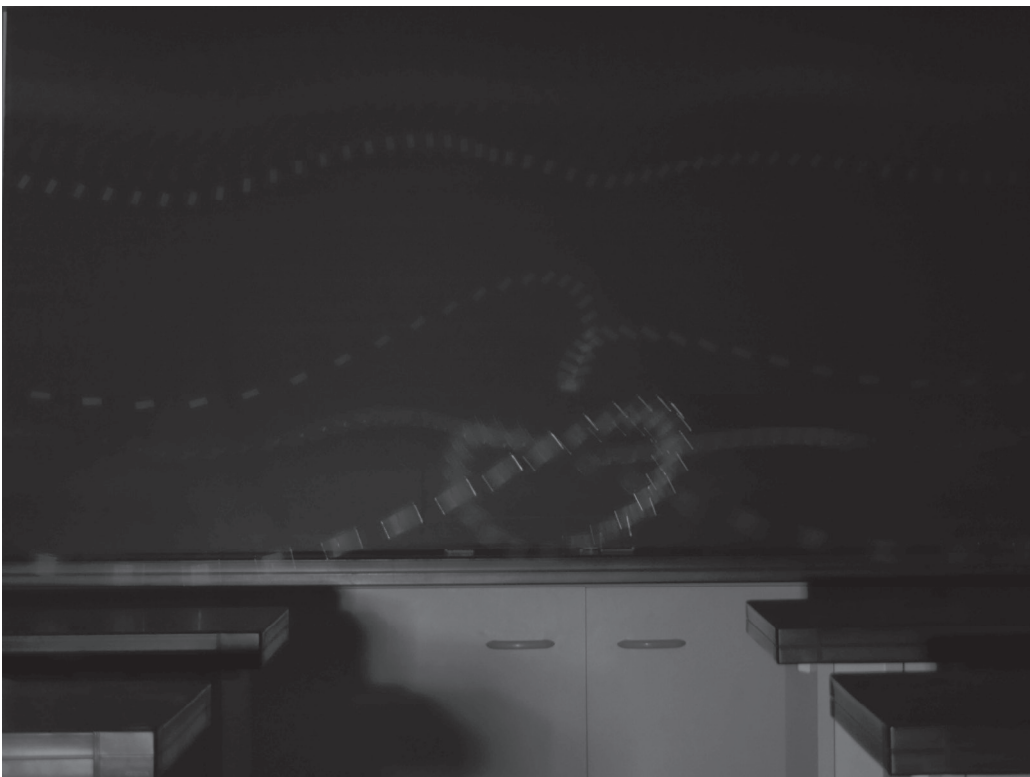
[図 1-1] ストロボ撮影で得られた画像



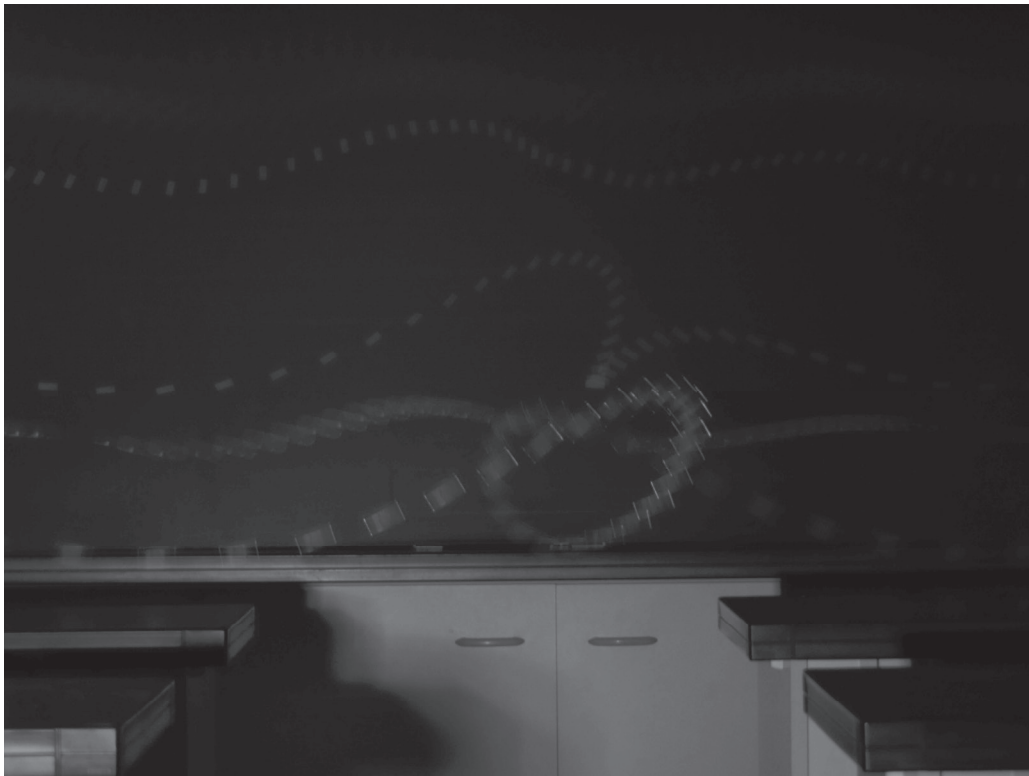
[図 1-2] ストロボ撮影で得られた画像



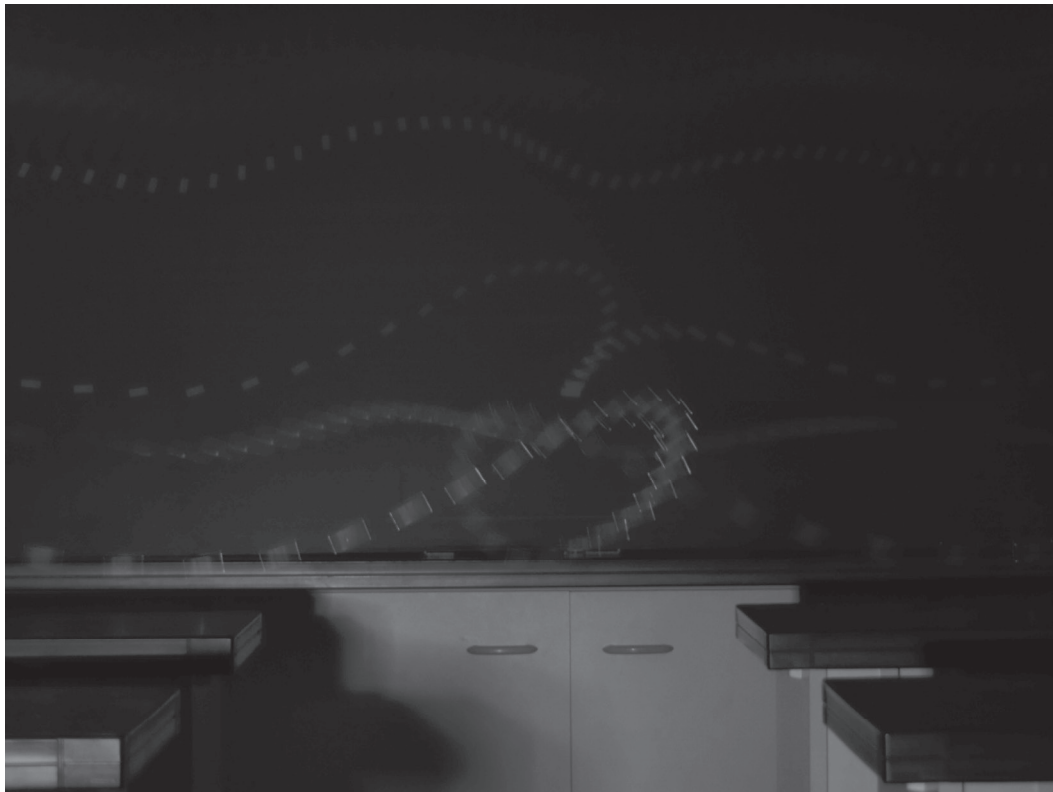
[図 1-3] ストロボ撮影で得られた画像



[図 1-4] ストロボ撮影で得られた画像



[図 1-5] ストロボ撮影で得られた画像



[図 1-6] ストロボ撮影で得られた画像



[図 1-7] ストロボ撮影で得られた画像



[図 1-8] ストロボ撮影で得られた画像

付録 B 第 3 章におけるプログラミングコード

第 3 章で行った実験に用いたプログラミングコードを以下に示す。

```
# 必要なモジュールの導入
from numpy import sin, cos
from scipy.integrate import solve_ivp
from matplotlib.animation import FuncAnimation
from matplotlib import animation, rc
from IPython.display import HTML
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

G = 9.8 # 重力加速度 [m/s^2]
L = 1.0 # 振り子の長さ [m]

# 運動方程式
def derivs(t, state):
    dydt = np.zeros_like(state)
    dydt[0] = state[1]
    dydt[1] = -(G/L)*sin(state[0])
    return dydt

t_span = [0, 20] # 観測時間 [s]
dt = 0.05 # 間隔 [s]
t = np.arange(t_span[0], t_span[1], dt)
th1 = 30.0 # 初期角度 [deg]
w1 = 0.0 # 初期角速度 [deg/s]
state = np.radians([th1, w1]) # 初期状態

sol = solve_ivp(derivs, t_span, state, t_eval=t)
theta = sol.y[0,:]
print(np.shape(sol.y))

x = L * sin(theta) # x = Lsin(theta)
y = -L * cos(theta) # y = -Lcos(theta)

fig, ax = plt.subplots()

line, = ax.plot([], [], 'o-', linewidth=2)
```

```

print(x)
print(y)

def animate(i):
    thisx = [0, x[i]]
    thisy = [0, y[i]]

    line.set_data(thisx, thisy)
    return line,

ani = FuncAnimation(fig, animate, frames=np.arange(0, len(t)), interval=25, blit=True)

#軸などの設定
ax.set_xlim(-L,L)
ax.set_ylim(-L,L)
ax.set_aspect('equal')
ax.grid()
plt.show()

rc('animation', html='jshtml')
ani

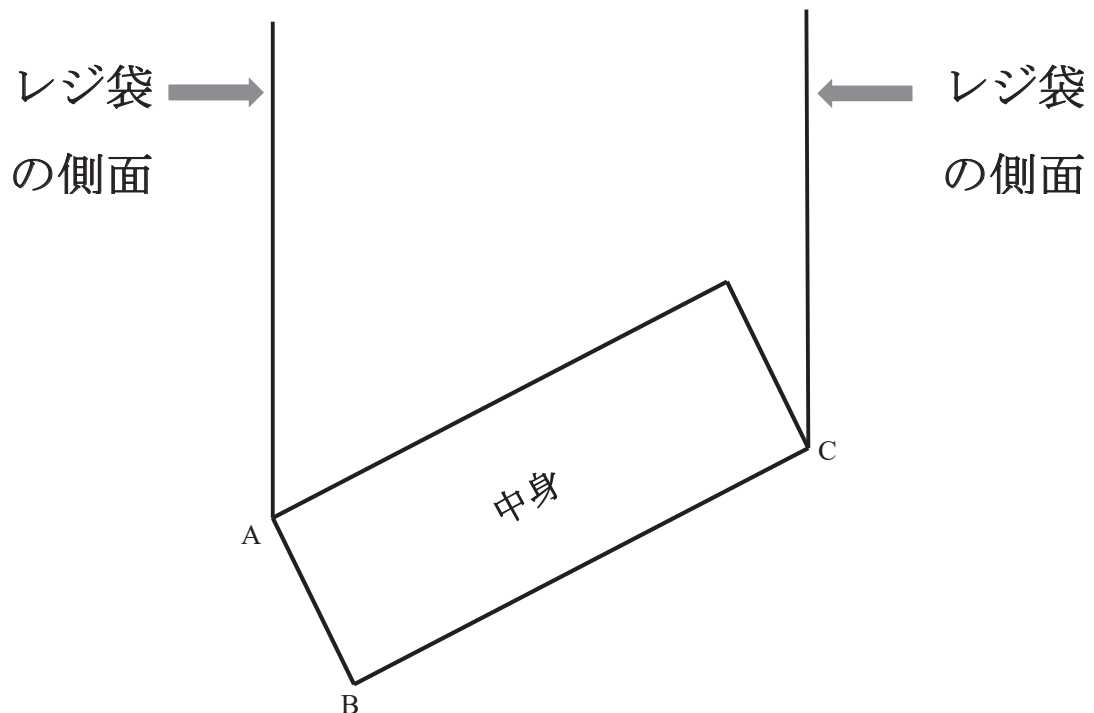
ani.save('pendulum.gif', writer='pillow', fps=15)

```

付録 C 力学計算に基づいたシミュレーション分析の詳細

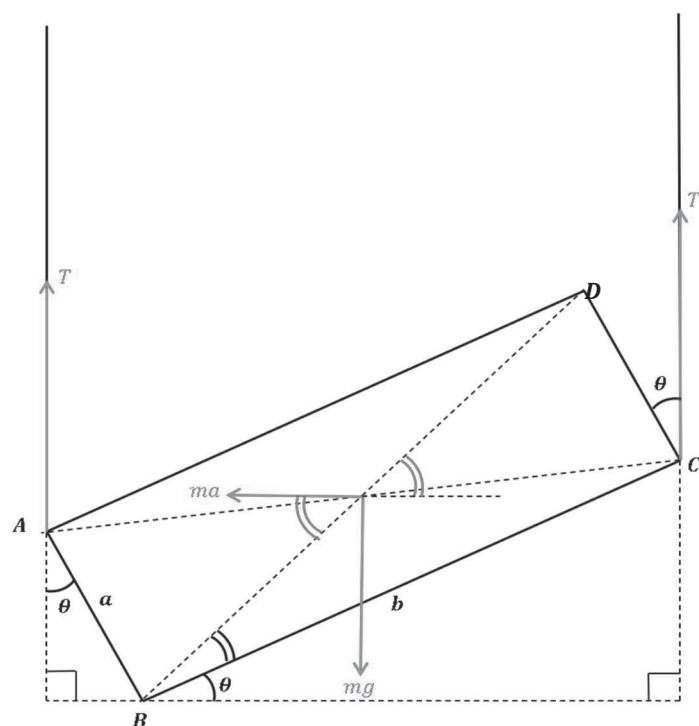
弁当箱が少し傾いた時に、弁当箱に働く力のモーメントを計算し、発生する力のモーメントが条件を変化するにつれて、どのように変化するのかプログラミングを用いて実験を行った。

まず、弁当箱がわずかに傾いてしまった状況を考える。そのままの状況では計算が困難であるので、設定を少し変更して以下の図のような平面の中で考える(図2)。図は、弁当箱が単振り子運動をして運動している際の最下点の状況を示す。



〔図2〕 弁当箱がわずかに傾いたときの平面

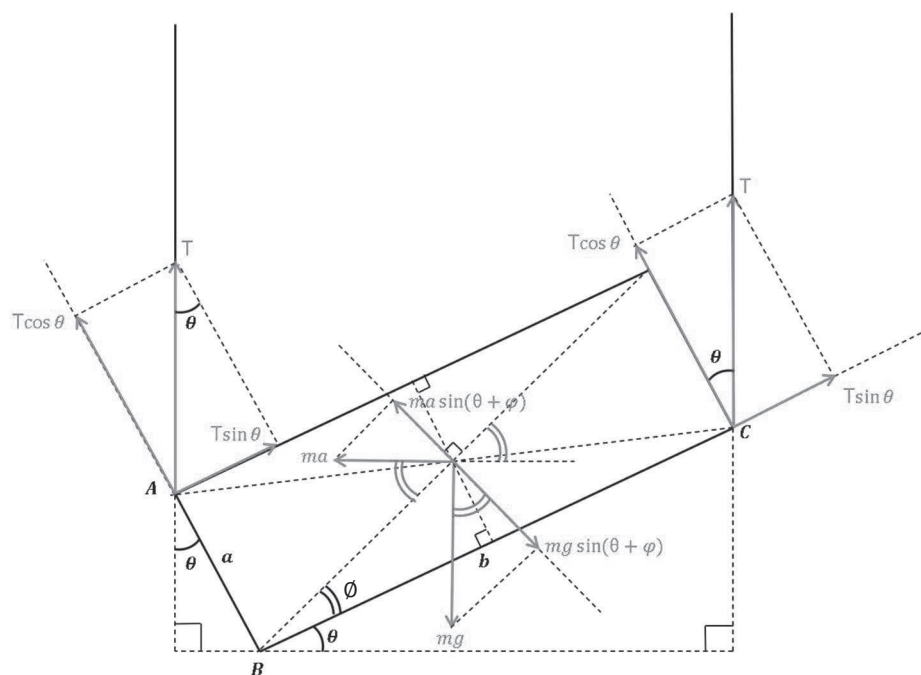
また、レジ袋の側面は糸であり、糸と頂点A・Cが固定されているものとして考える。さらに、各糸に働く張力は等しく T であるものとし、糸同士は平行であると近似して考える。さらに、弁当箱は運動の最下点の位置である者として考えると、弁当箱に働く力は以下の図のように示すことができる(図3)。



〔図 3〕 傾いた弁当箱にはたらく力

ここで、弁当箱は最下点の位置に存在するので、慣性力は水平方向にはたらく。また、状況設定より糸は平行に張られているので、各糸にはたらく張力 T も平行に働く。

このときに B 点周りにはたらく力のモーメントを考える。重力 mg 、慣性力 ma については、直線 BD 成分と直線 BD に鉛直な成分の 2 つの成分に分割して考える。モーメントを計算しやすくするために弁当箱にはたらく力について成分を分けて考えると以下の図の通りになる (図 4)。



〔図 4〕 傾いた弁当箱にはたらく力 (成分別)

したがって、B 点まわりにはたらく力のモーメントは

$$-aT \sin \theta + bT \cos \theta - \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{2} (mg \cos(\theta + \phi) - ma \sin(\theta + \phi)) \quad (3)$$

これを整理して

$$-aT \sin \theta + bT \cos \theta - \frac{m\sqrt{a^2 + b^2}}{2} (g \cos(\theta + \phi) - a \sin(\theta + \phi)) \quad (4)$$

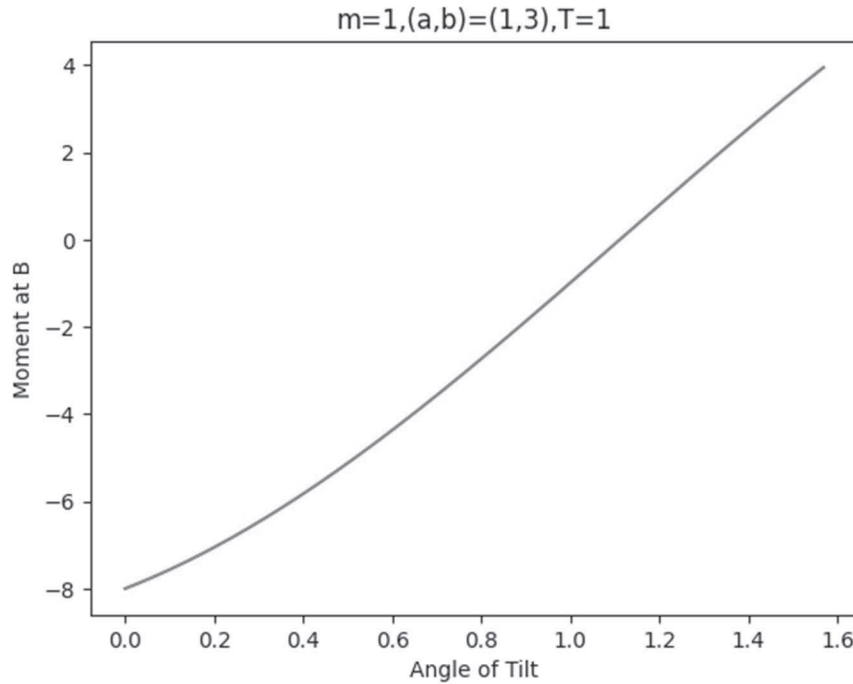
ここで、 $\phi = \tan^{-1} \frac{a}{b}$ より

$$-aT \sin \theta + bT \cos \theta - \frac{m\sqrt{a^2 + b^2}}{2} \left(g \cos \left(\theta + \tan^{-1} \frac{a}{b} \right) - a \sin \left(\theta + \tan^{-1} \frac{a}{b} \right) \right) \quad (5)$$

次に、求めた B 点まわりにはたらく力のモーメントについて、諸条件のパラメータを変化することによってどのように変化するか実験した。実験はプログラミング (python) を用いて行った。以下、結果と考察である。

(1) $m = 1, a = 1, b = 3, T = 1$ のとき

諸条件を決定するパラメータを全て 1 とした時の図を以下に示す (図 5)。ただし、弁当箱の形状から $a < b$ であるので、 b に関しては例外として 3 としている。なお、横軸は理想弁当の傾き θ 、縦軸は B 点まわりの力のモーメントである。



〔図 5〕 理想弁当にはたらく力のモーメント

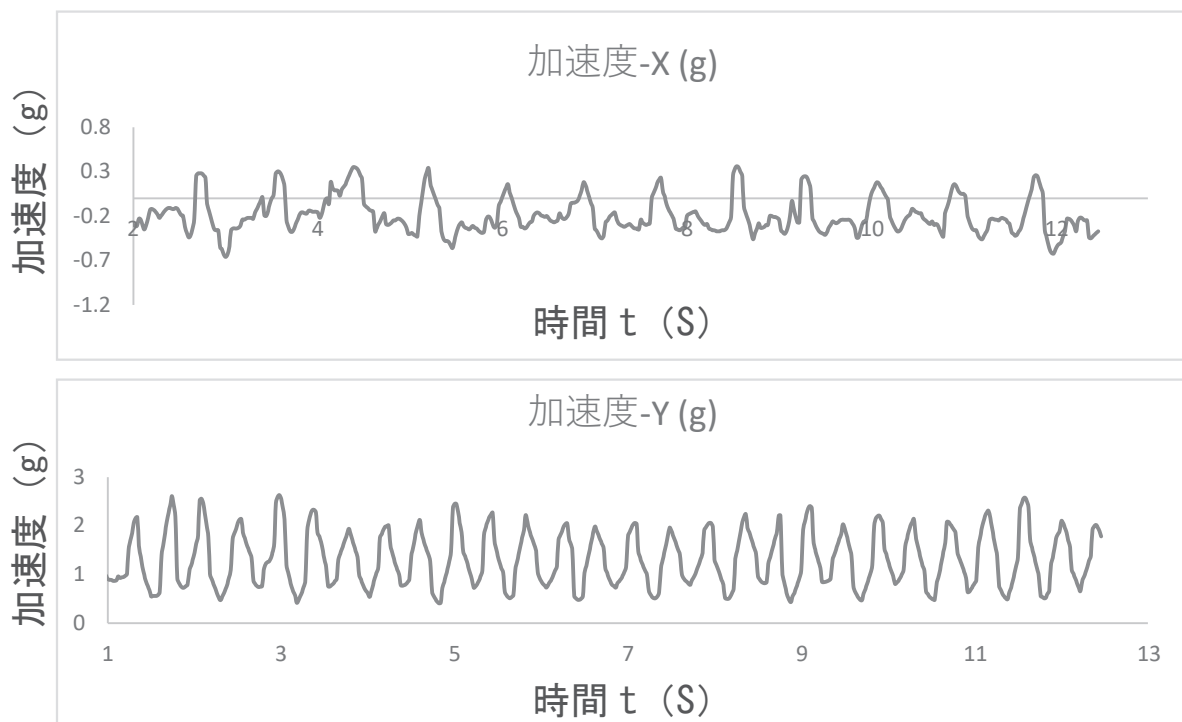
このグラフから、B 点まわりの力のモーメントは、弁当箱が傾いたときに傾く θ に依存して変化することが分かる。

付録 D 予備実験の結果

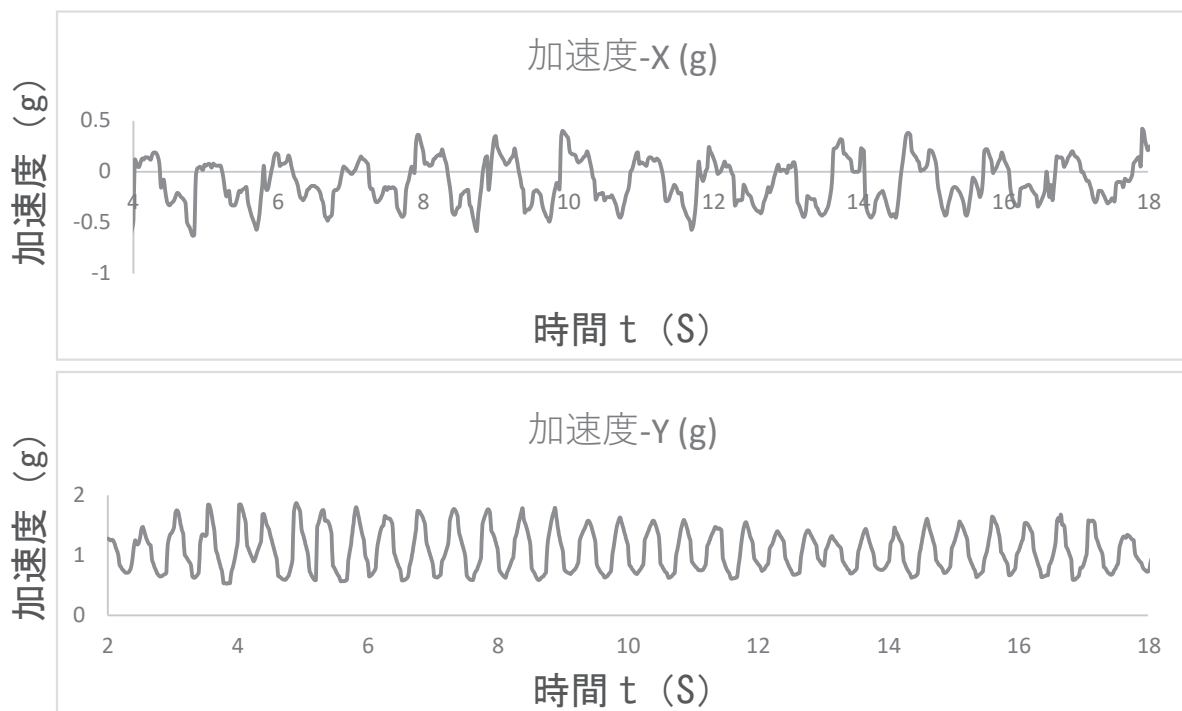
第4章第5節で言及した予備実験の詳細の結果の概要を以下に示す。

・被験者 A

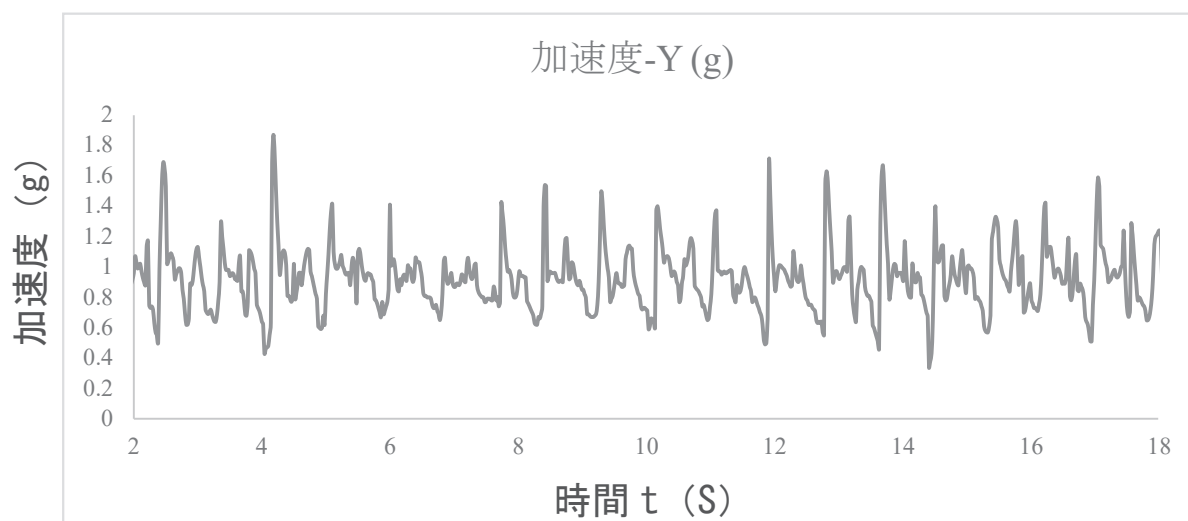
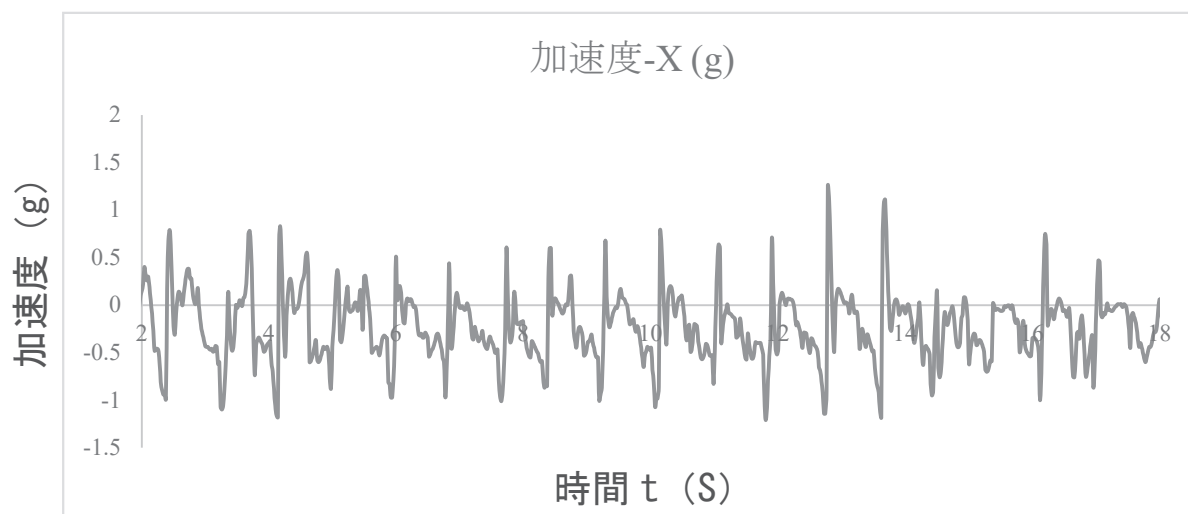
(1) おもり 0 kg のとき



(2) おもり 1 kg のとき



(3) おもり 5 kg のとき



参考文献

- [1] 「令和 2 年 11 月レジ袋使用状況に関する WEB 調査」環境省環境再生・資源循環局総務課リサイクル推進室「みんなで減らそう レジ袋チャレンジ」広報事務局.2020.12.9
- [2] 横田新吾「ビニール袋で弁当箱を傾かせずに持ち歩く方法」
大阪学院大学情報学部報学科卒業論文概要 (2006) p.1-2
- [3] 藤野大基「長方形の容器内の液体の重心の軌跡」 (2023)
- [4] 「教育用データロガー ポケットラボ 取扱説明書」ケニス株式会社
- [5] 「イメージングソリューション」『【Excel】フーリエ変換』
https://imaging-solution.net/office/excel/excel_discrete_fourier_transform/ (2023.1.17 閲覧)