

人力動力測定装置を用いた基礎的力学とエネルギー問題の理解

八房 智顯*

(平成30年10月30日受付)

Comprehension of basic mechanics and energy issue by using human-power dynamometer

Tomoaki YATSUFUSA

(Received Oct. 30, 2018)

Abstract

Actual experience and feeling are very important for better understanding of classroom lecture. The author is in charge of one theme in the experimental practice course carried out for the third year student. The theme is human-power measurement by rope tagging. This theme is developed to make students feel directly the dynamics for correct understanding of the phenomenon. Furthermore, this theme is also aimed to make students understanding the energy problem. Experimental equipment and procedure are designed that students can proceed by their own initiative. In this thesis, details of experimental equipment and procedure are firstly explained and results of implementation including students' impression are described.

Key Words: human-power measurement, active learning, self-learning

1. はじめに

技術者が身につけるべき重要な力のひとつは、机上での計算によって得られる数値データからリアルな現象を想像できるかどうかである。近年はテレビゲームなどのバーチャルな遊びが増え、相対的に実際にモノに触れる遊びが減っている。こうした遊び方をして育った学生自身は、モノに「触る」もしくは「壊す」経験が少なく、上述の「数値データからリアルな現象を想像する力」が弱い場合が多い。この力が弱ければ、座学においても講義の中で説明されている内容からリアルな現象を想像することが難しく、内容に対して興味が深まりにくくなり理解度も高まりにくい。

筆者は実験科目(知能機械工学実験)を通じて、机上の数値データと実際の現象を目視および体験することで、「数値データからリアルな現象を想像すること」を経験し、その重要性を理解させることを目的として新たな実験テーマを検討し実施した。

2. 実験手法の検討

本実験において学生が体験できる「リアルな現象」として「力」と「仕事率」を検討することにした。「力」と「仕事率」はいずれも学生自身の筋力から発生するものを利用する。これらを計測することによって数値データとし、得られた数値データと自分自身でその「力」と「仕事率」を発生させた際の感覚を比較して、数値データと実際の現象の関係を感覚的に実感させる。

筋力には身体で最大の力を発生できる脚力を用いて実験を行う。力 F を作用させながら力の作用方向に速度 V で移動させた場合、発生する仕事率 P は以下のように与えられる。

$$P = FV \quad (1)$$

回転運動系であれば、トルク T を作用させながらトルクの作用方向に角速度 ω で回転させた場合に発生する仕事率 P は

* 広島工業大学工学部知能機械工学科

$$P = T\omega \quad (2)$$

(1) の直線運動系では力 F と速度 V を、(2) の回転運動系ではトルク T と角速度 ω を計測すれば仕事率 P を算出できる。

昨年度までは自転車ベースとした動力測定装置を用いていた。被験者となる学生はブレーキのかかった状態で全力でペダルを漕ぎ、クランクに加わるトルクと回転速度を計測して前述の式 (2) により仕事率を算出した。しかし自転車のゴム製ブレーキは耐久性が不十分であり、さらに自転車のフレーム剛性についても不十分でトルクの計測制度に影響が出ていた。このため本年度は自転車をベースとはせず、①機械剛性が大きく、②安定した大きな制動力を発生でき、③耐久性の高い制動装置を有した動力測定装置を製作することにした。このように本実験で用いる動力測定装置においては、特に制動方法が重要となる。このような

要求性能を満たすものは市販されているものの中には存在しないので筆者自身で製作した。製作の様子と出来上がった動力測定装置を図1に示す。

安定的かつ耐久性の高い制動方式としてロープとドラムを用いて制動する方法を用いた。ロープをドラムに巻きつけることにより、ロープとドラムの間の摩擦によってロープに強い制動力をかけることができる。摩擦力はオイラーのベルト理論によって推定でき、ロープの巻き付け角度に対して指数関数的に摩擦力が増加するため大きな制動力が期待できる。また摩擦熱の放熱も耐久性の面から重要となるが、ロープとドラムの接触面が長いこととドラム内面からの放熱性により、放熱面では有利となることが期待される。

ロープを牽引して生じる仕事率を求める場合、算出には前述の式 (1) を用いる。このため仕事率を求めるためには、ロープの牽引力 F と牽引速度 V を同時に計測する必要がある。図2に制動装置および牽引力と牽引速度の計測方法について示す。制動は写真のように金属ドラムにロープを巻き付けて行った。ドラム上流側には調整用ブレーキが設置してあり、調整用ブレーキのブレーキ力がドラムブレーキで増幅される。ロープの張力は滑車によってロープの進行方向を180度反転させ、その際の滑車に加わる力を計測することでロープの張力、すなわち牽引力を調べることができる。滑車に加わる力の計測は滑車を保持するアルミパイプに歪ゲージを取り付け、アルミパイプのひずみ量を調べて行った。ロープの牽引速度はロープを保持する滑車の回転速度を計測することで計測した。滑車の回転速度は滑車に反射テープを張り付け、光タコメータで回転速度を計測した。歪ゲージ出力電圧とタコメータ出力電圧はオシ

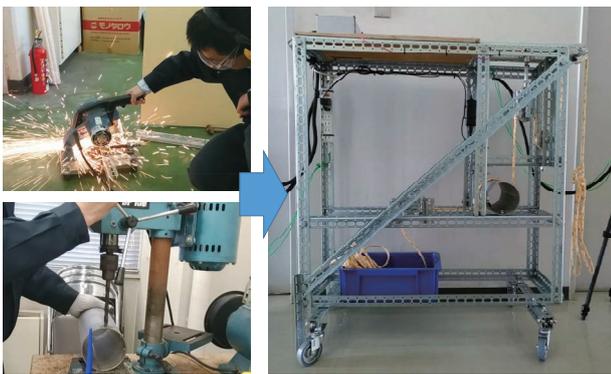


図1 製作の様子と動力測定装置外観

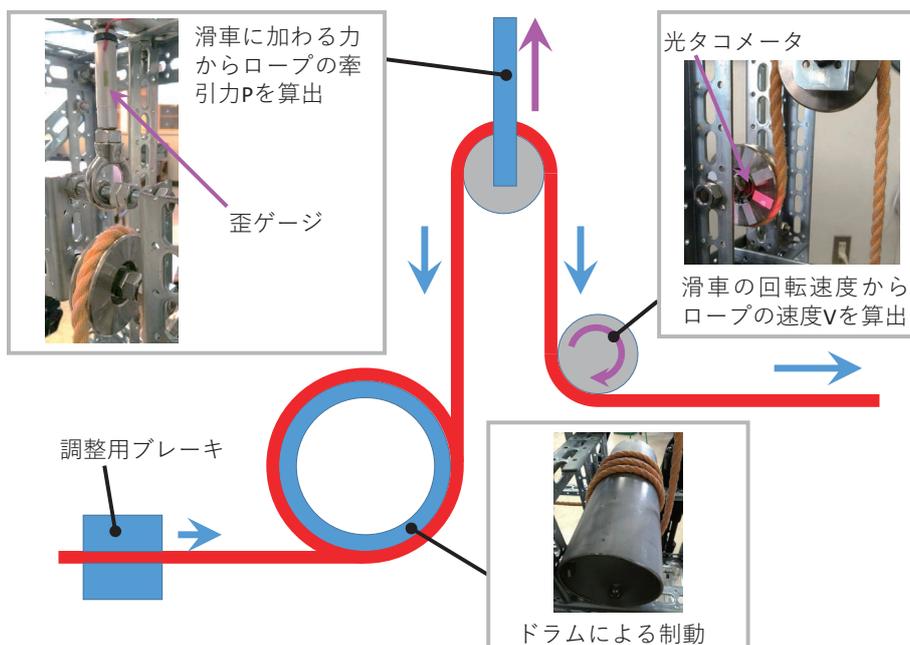


図2 ロープ牽引力と牽引速度の測定方法

ロスコープで記録する。これらの電圧データを後処理することにより、仕事率を算出することができる。

3. 実験およびデータ処理手順

3.1 ロープ牽引力と牽引速度の校正実験

ロープ牽引力と牽引速度はいずれも電圧データとして記録されるため、事前に校正実験を行い電圧値との関係を調べておく必要がある。まずロープ牽引力の校正について説明する。ロープを校正用に設置した上段の滑車に通し、鉛直下向き方向にロープを引く。この際、ロープは完全に固定しドラムブレーキを滑らないようにしておく。ロープに加える鉛直下向きの力を順次変更し、その時の歪ゲージ電圧を調べることでロープ牽引力と歪ゲージ電圧の関係がわかる。ロープの牽引力調整は図3に示す方法で行った。板の両端をロープ制動装置から垂直に垂らしたロープと荷重計で保持する。板には既知の荷重（体重）を加え、板の重さと既知の荷重の合計から荷重計の読み値を差し引いた値がロープに掛かっていることになる。荷重の位置を変更することによって、ロープに掛かる荷重を自由に変更することが可能である。ロープに掛かる荷重を変更して歪ゲージの電圧出力を計測し、荷重と歪ゲージの出力電圧の関係を調べた。

次にロープ牽引速度の校正実験である。ロープを保持する滑車の回転速度は光タコメータによって計測し、光タコメータからのアナログ電圧出力をオシロスコープで記録する。光タコメータが計測する回転速度とアナログ電圧出力の関係は既知であるので、光タコメータ出力電圧とロープ牽引速度の関係を知るためには、滑車の回転数とロープの繰出し量の関係が分かればよい。ただし滑車とロープは滑らないものとする。これを調べるためロープを特定の距離ほど牽引し、その際の滑車の回転数を数えることで滑車の回転数とロープの繰出し量の関係を調べた。

3.2 実験手順

ロープは安全ベルトを腰に巻き、安全ベルトにロープを接続して牽引する（図6参照）。学生の中から被験者を1名決め、制動力（牽引力）を3段階程度に変更してロープを牽引する。制動力の強弱に関わらず、被験者は全力で牽引

するようにする。牽引時間は9.0秒間もしくは15mの牽引区間を引き切るまでの時間とした。制動力を変更してロープを牽引した際の疲労感も実験の考察対象とするので、それを被験者は意識して牽引するようにする。実験班の他のメンバーについても、全員が1回ずつはロープの牽引を行う。実験毎にオシロスコープで電圧データを記録し順次PCに保存する。オシロスコープのサンプリングレートは5,000 S/sであり、歪ゲージ電圧と光タコメータ出力電圧の2チャンネル分があるので、記録したデータ点数は合計90,000点となる。

3.3 データの後処理

保存したデータは授業用WEBサイト（Moodleベース）にアップロードし、各自が授業後にデータ処理を行う。校正実験から歪ゲージ電圧と牽引力の関係式、光タコメータ出力電圧と牽引速度の関係式を求め、これらの関係式によって電圧の記録データを牽引力と牽引速度に変換する。記録データ点数が9万点であることから、マイクロソフトエクセル等の表計算ソフトを使ったデータ処理が必須となる。最終的には牽引力、牽引速度、および仕事率の時間変化をグラフにする。

4. 実施結果

4.1 校正実験

ロープ牽引力の校正実験の機材を図4に示す。校正実験の際に必要な機材は準備するが学生に対して具体的な校正方法は説明しない。この校正実験では、ロープに対して鉛直下向きに“特定の大きさの”力を掛ける必要がある。準備された機材を目の前にして、具体的な校正実験の方法を考える。本方法ではロープや荷重系の支持位置、および荷重の位置を特定する必要がない。単純な力学ではあるが、答えに行きつかずに苦勞する場合も見られる。このような力学系は例えば材料力学の梁の問題などでよく見られるものであるが、座学では問題を解くのに終始し“リアルな現象”をイメージすることに注力していないために、実物を目の前にすると応用が効かないのかもしれない（図5参照）。

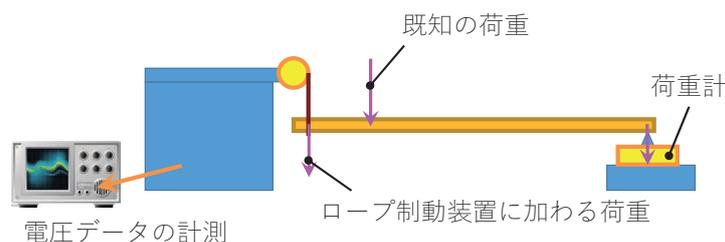


図3 ロープ牽引力と牽引速度の測定方法



図4 ロープ牽引力の校正実験機材



図5 ロープ牽引力の校正方法を考えている様子

4.2 ロープ牽引実験

次に実際にロープの牽引実験の様子を図6に示す。ロープを牽引する際に牽引を難しくするのは、筋力の強弱よりも“靴の滑り”である。ロープの牽引力を支えるのは最終的に靴と床の摩擦であるから、靴が滑ってしまってロープを牽引することができないという事実を体験することにより、“摩擦による力の保持”や“力のつり合い”などを実感できることが期待される。

また制動力を変化させた場合の牽引についても、被験者1名についてのみではあるが実施する。一般には制動力 F を大きくすると牽引速度 V が小さくなり、制動力 F を小さくすると牽引速度 V が大きくなる。仕事率 P は FV であるから、制動力を大きくして牽引速度が零に近い場合には仕事率も零になる。逆に制動力を小さくしても牽引速度が大きければその方が仕事率が大きくなる場合もあり得る。前者と後者を比較した場合に、どちらが牽引時の疲労度が大きかったかを考えることで、仕事率というものを実感させることが期待される。

さらにその他の参加者全員にロープ牽引を課している。自分の牽引時の仕事率を算出し、エネルギー量を計算させて自宅の電気使用量と比較させる。これらの比較によって、

普段自分が生活に使っているエネルギー量を実感させ、エネルギー問題、さらには環境問題について“リアル”に実感させることができると考えている。



図6 ロープ牽引実験の様子

4.3 データの後処理

本実験テーマではPCを使ったデータの後処理も重視している。前述のとおり、記録されたデータ点数は1実験あたり9万点であるため、マイクロソフトエクセル等の表計算ソフトを使ったデータ処理が必須となる。このため実験データの整理には、データ処理方法の理解のほかに、エクセル等の使用方法を理解する必要がある。授業の中では、データ処理方法とエクセルの使用方法についての説明は一切せず、これらの方法をまとめた資料を授業用WEBページに提示した。学生は提示された資料に基づいてデータ整理の概要を自ら理解し実行する。

特にエクセルの使い方に関しては、授業用WEBページの情報だけでは不十分であるので、他の学生に聞くかインターネットで自ら調べる必要がある。学生間で「教える・教わる」ことも重視しており(図7)、レポートの中に教えてもらった人の名前を記入させるようにしている。名前がレポートに記入された学生については得点を付与することとし、学生間での「教える・教わる」ことに対してインセンティブを与えている(図8)。ただし他者のレポートのコピーについては単位の不認定など厳しく対応する旨を伝えており、現状ではコピーによる他者のレポートの丸写しなどは見られていない。図9は実験データ整理結果の一例である。校正実験で求めた変換式によりオシロスコープで記録された電圧データが牽引力と牽引速度に変換され、図に示されている。これらの牽引力と牽引速度から仕事率が求められているが、ここに示した例ではその時間平均値は886Wであり、人力でありながらも「1馬力」を超えている。

5. 学生の反応および感想

レポート中には実験結果と考察のほかに、実験を実施し

での感想も記述するよう指導している。以下に書かれた感想の例を示す。

例 1 :

「自分で考えるということはどれだけ大切かということ改めて感じた。このレポートを作成する上で、教えてもらう場面がいくつかあった。その中で、教えられるがままにグラフを作成する場面があった。最初はあまり理解できていなかったこともあり、その場しのぎだった。しかし、レポートを完成させていくうちにそのグラフをしっかりと理解できていないと先に進めないということがわかった。そのため時間はかかってしまったが、しっかりと理解し問題を解決することができた。」



図 7 実験データ整理時における学生間での協働

協業者リスト		
※教えてもらった人を記入。他班でも良い。成績に反映します。		
※記入・印刷し、レポート表紙の次ページに入れる。		
学生番号	氏名	寄与の割合
AD16		40%
AD16		30%
AD16		10%
AD16		8%
AD16		8%
AD16		2%
AD16		2%

図 8 実験データ整理の協働結果の例

例 2 :

「今回の実験装置では滑車で力の方を変えつつタコメータで回転数を計測すると同時に歪ゲージによる牽引力測定も可能となっていた。工学の知識がなければ実験装置はもっと複雑化するだろうと感じた。」

例 3 :

「今住んでいる家の電気使用量は1ヶ月で約 740 kWh だった。また自分の脚力の1秒当たりの出力を平均して算出し、1ヶ月分の出力を求めると 536 kWh ということがわかった。これより一ヶ月不眠不休でさらに全力で人力発電しても家の電気使用量をまかなうことができなかった。このことから、電気を作り出すことの大変さや今の発電方法について考えるきっかけとなった。」

例 4 :

「今回の実験はより実生活と関連付けしやすいテーマだった。自分の体から出力される動力を求めるということで、普段普通に使用している家電や車、バイク、空調などが使

実験者 (AD16) 2回目のグラフ

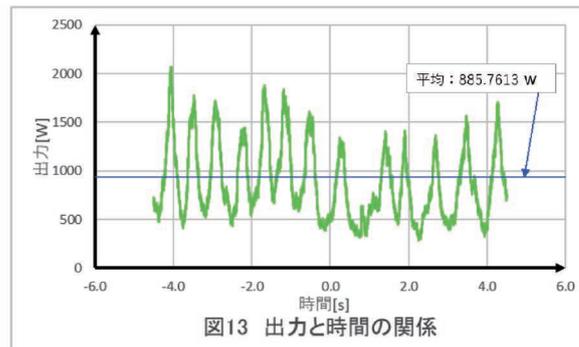
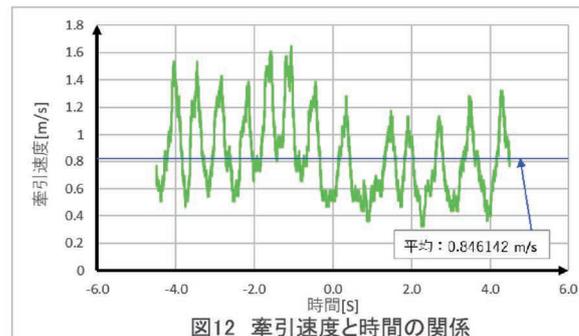
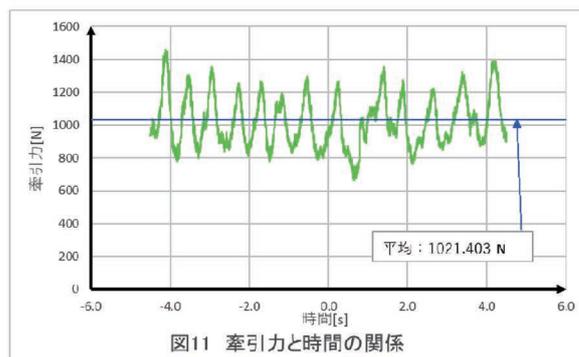


図 9 実験データ整理結果の例

用するエネルギーが膨大であることが身に染みて実感できた。」

例5：

「今回の実験は班員たちと協力して行い、いろいろな交流があつて楽しかった。レポートの作成方法を教えてもらったりして仲間と協力することの大切さを再確認することができた。また実験を通して普段の生活を見直そうと思った。エネルギーの無駄遣いをしないようにしたい。」

6. まとめ

実験科目において数値データを体感できる実験テーマを開発し実施した。開発した実験装置は人力でロープを牽引し、牽引力と牽引速度から仕事率を算出するものである。牽引時の力の感覚と実際の牽引力の関係、牽引時の疲労の

程度と仕事率の関係など、数値データと自分の感覚を比較することにより、机上の数値とリアルな現象の感覚的な関連付けが期待される。また牽引時のエネルギーを考察することにより、普段自らが使っているエネルギーの量を体感することも期待できる。学生が作成したレポートに記述させた感想には、目的とする“机上の数値とリアルな現象の感覚的な関連付け”と“エネルギー量の体感”について、当初の目的どおりこれらを学生に実感させることができたと考えている。

文 献

1. 2018年度 知能機械工学実験書 広島工業大学工学部知能機械工学科 (2018)