

1. 授業の概要

テーマ名：熱機関の性能の評価

担当者：加藤義隆（助教 ykato@oita-u.ac.jp, 居室は理工 2 号館 2 階 208 号室）

低温度差スターリングエンジンの実験を題材に、測定データを Microsoft Excel で整理する。主な取り扱い内容は、初回が FFT の取り扱いと VBA の利用、第 2 回がグラフおよびレポートの作成とする。

2. 受講に関する注意

作業に使用するノートパソコンは、Microsoft Excel で、[データ] タブの [分析] グループで [データ分析]が表示されるようにしておいてください。[データ分析]が表示されない場合は、分析ツール アドイン プログラムを読み込む必要があります。

3. 評価

評価はレポートで行う。以下が評価基準である。

- 指定した図が 2 種類のグラフが示されている：60 点
- レポートが実験レポートとしての体裁を保っている(注 1)：10 点
- レポート上の図の幅が 80 mm未満に収まっている：10 点
- レポート上で表示されるグラフの文字サイズが妥当：10 点
- ファイルサイズが 2MB 未満に収まっている：10 点

注 1：文字は、サイズを 10.5，フォントを明朝体系もしくは Serif 文字にする。用紙設定は縦長の A4 サイズに上下左右の余白を 20～25mm にする。表紙は省き、レポートの冒頭に、授業名・テーマ名・授業日の年月日、提出日の年月日、レポート作成者の氏名・所属・学籍番号・連絡先を記載する。ページ番号を入れる。以下は、「実験目的・実験方法・結果・考察・結論などを臨機応変に章立てし、番号をつけて見出しを入れる」「1 人称 2 人称を文章中に用いない」「言い切り口調の口語で記述する」などの実験レポートの形式に準じて作成する。

提出方法は、Moodle 上に、2MB 未満のマイクロソフト Word もしくは PDF の添付ファイルで送る。白黒印刷した紙媒体で評価を行う。提出締め切りは当該テーマ最終日から 1 週間後の 5 限開始前までとする。原則として、再提出は受け付けない。

実験目的は、データのノイズを低減しつつ図示仕事の変化が小さいデータ処理を選択することである考察では、バンドパスフィルタの条件が図示仕事の大きさに与える影響を議論する。

4. 背景および実験装置の紹介

低温度差スターリングエンジンは、1983年に Ivo Kolin によって実証された[1]、お湯で動く機械です。元になる原理は Hot air engine と称して 1817年に Robert Stirling によってスコットランドで発明されたスターリングエンジンと同じです。スターリングエンジンは 20 世紀の初めに実用的な原動機として廃れるまで、石炭などを燃料に動力を発生させる「原動機」として用いられてきました。スターリングエンジンの技術は、20 世紀初めに廃れた後、軍事研究の対象として注目されました。教育目的の玩具としても利用される一方で、スターリングエンジンは研究や開発の対象になってきました[2]。

図 1[3]は Elsevier 社の英文ジャーナルで報告された、 100°C 未満の加熱で動作させた低温度差スターリングエンジンの PV 線図として恐らく一番最初の図です。多少実験データなので細かい凸凹があります。図 2 は似ていますが、凸凹がひどく出ています。図 1 と図 2 は、多少条件が異なりますが、それぞれ図 3 や図 4[4]に示すように加熱装置を変えただけで概ね同じ実験装置で得られた実験結果です。図 3 の方は、本当に蒸気で加熱して、温度分布を計っています。図 4 の方は電気ヒータで加熱しています。

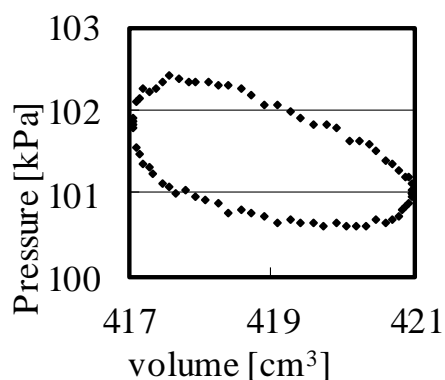


図 1 ノイズを処理した PV 線図

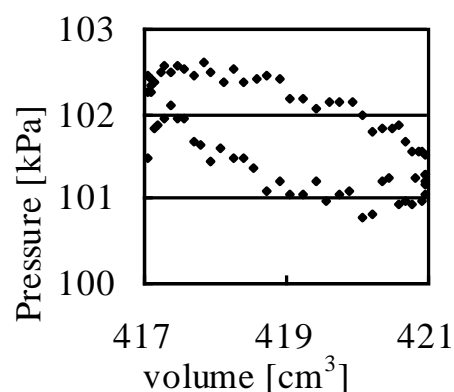


図 2 ノイズを処理していない PV 線図

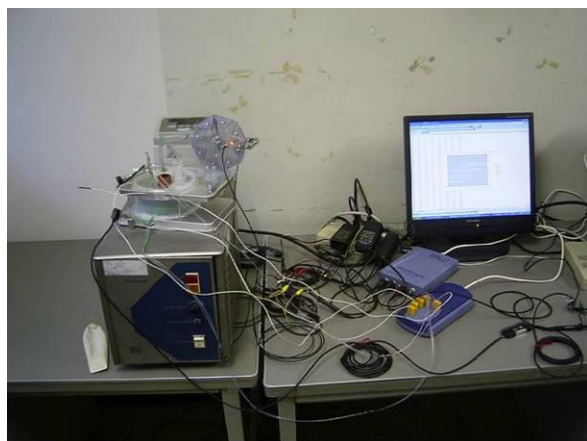


図 3 蒸気で加熱した実験の様子

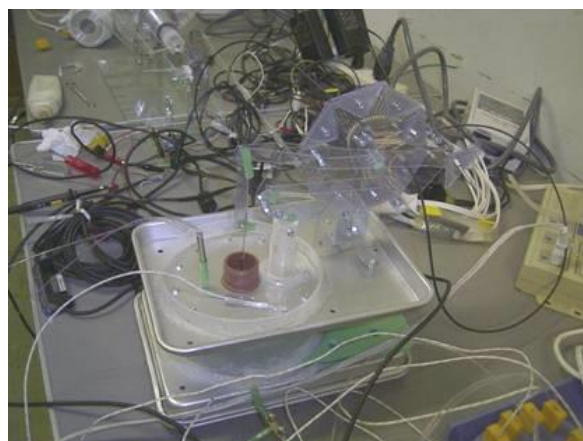


図 4 電気ヒータで加熱した実験

実験結果の評価方法としては、図 1 や図 2 の PV 線図で囲まれた面積や形を評価するのです。この評価に際して、図 2 のようにノイズだらけでは線の傾きからデータを解析することが困難で、

一方図 1 のようにノイズを処理すると PV 線図の形状が不適切に変化していることも懸念されます。どこまでノイズを処理するのも検討の対象になるのです。ちなみに図 3・図 4 で計測されている低温度差スターリングエンジンは、大分大学で夏休みに参加者を募集している「2 日コース」の DIY 入門の工作教室で利用している低温度差スターリングエンジンと概ね同じものです。
[5]

図 5 は異なる機種の実験結果ですが、同じ実験に施した 4 種類のノイズ処理を比較する PV 線図です。データが重なって表示されているので、データが 4 種類表示されていることを読み取るのも大変で、概ね同じような形をしている印象を受けます。

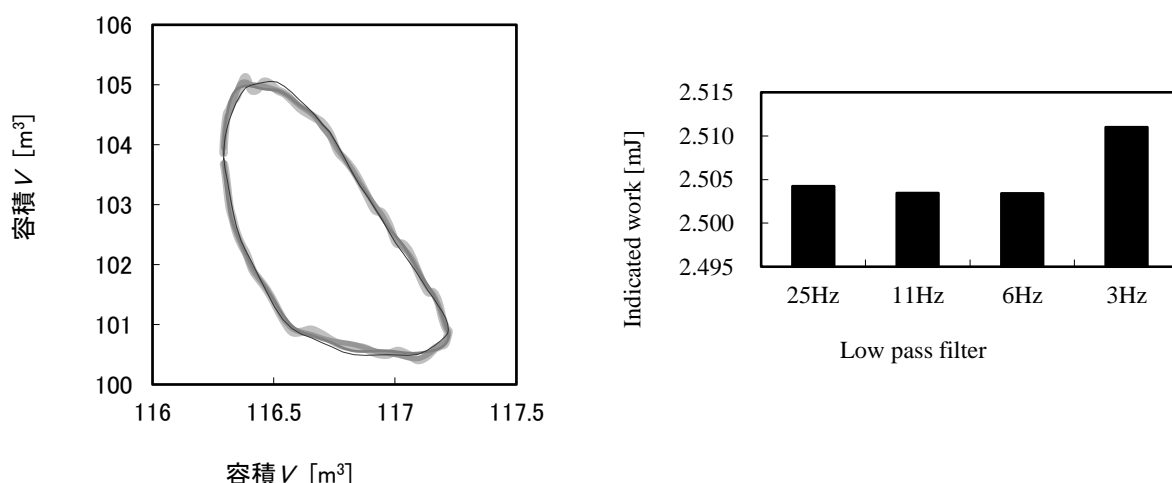


図 5 4 種類のノイズ処理を比較した PV 線図 図 6 4 種類のノイズ処理を施した PV 線図の面積の比較

しかし図 5 の面積の大きさを比較した図 6 のグラフを見ると印象が異なってきます。「3Hz」は後述するローパスフィルターをかける周波数で、縦軸の Indicated work が図 5 の PV 線図の面積です。意図的に違いを顕著にする縦軸の取り方をしたが、相対的な値の変化は「25Hz」「11Hz」「6Hz」の Indicated work に対して、「3Hz」のときの Indicated work は+2%程度である。この 2%の違いが考察に影響しなければ、図 5 の形状も大きく異なる訳でもなく、どの処理でも差し支えないと結論付けても良い。

ちなみに実験の測定項目は図 7 から読み取れます。圧力の測定結果は、圧力センサ「Keyence AP-41A」を信号増幅器「Keyence AP-44」につなぎ、USB oscilloscope Picoscope4424 を通して取り込んだ。体積は直接計ることが出来ないで、容積変化を起こす機構の角度から計算で容積を推定した。体積の推定に必要な機構の角度は、光ファイバ「Keyence FU series」をエンコード「Keyence FS-N11N」につないで On-Off の信号を USB oscilloscope Picoscope4424 を通して取り込んだ。このデータは、エンコーダの信号は遮光状態で 0V とし、容積が一番小さくなるクランク角の 15 度手前から遮光し、その他クランク角 5 度毎にクランク角 2 度遮光する。

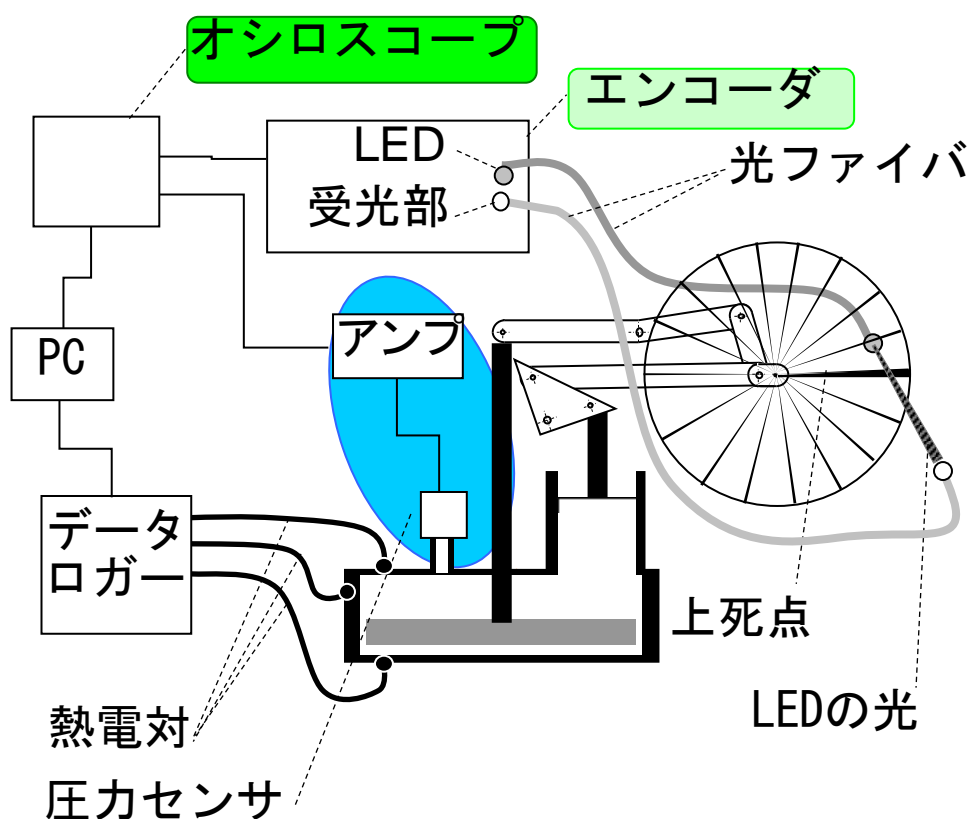


図 7 PV線図を計測する実験装置の測定項目

5. 処理するデータの特徴

ここで扱うデータ処理の特徴は、「ノイズの除去」と「データの抽出」である．圧力の信号は，Excel が備えた FFT と逆 FFT の機能を用いたバンドパスフィルタによるノイズカットをする．ノイズカット済みの圧力信号からマクロでエンコーダの On-Off の切り替わりのタイミングの信号だけを抽出する．

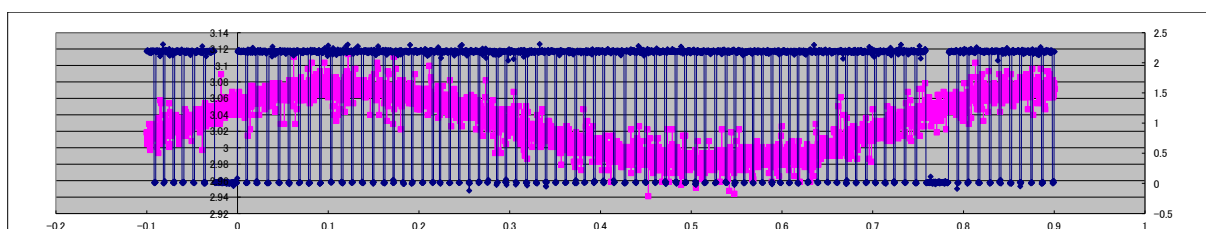


図 8 Excel でグラフ表示した生データで，横軸に秒単位の時間，ピンクで圧力計の電圧，紺色でファイバセンサ電圧を表したもの

図 8 は取り込んだ信号を MS-Excel で処理する際に，概要を確認するために Excel グラフ作成機能を利用して表示した生データである．横軸が秒単位の時間，縦軸が信号の電圧である．ピンクが圧力計の電圧，紺色がファイバセンサ電圧を表している．「紺色の信号の上下動が大きく間が空いている箇所」が，容積が最も小さくなるクランク角の「目安」である．この大きく信号が出ない箇所が 2 回以上含まれた上で，横軸方向に 4092 個のデータが並んでいる．圧力振幅の信号

は、圧力振幅の挙動に対してやや大きなノイズがある。デジタルオシロスコープが備えたローパスフィルターの処理によって、データの数は FFT に必要な 2 のべき乗個に揃えてある。

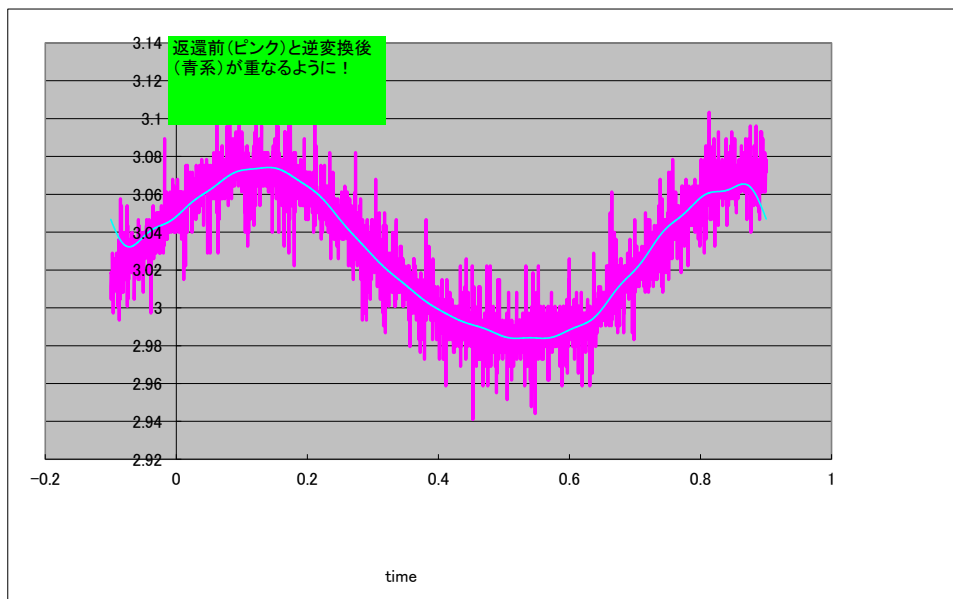


図 9 Excel 上で確認のために表示するノイズ処理前のデータとノイズ除去後のデータ

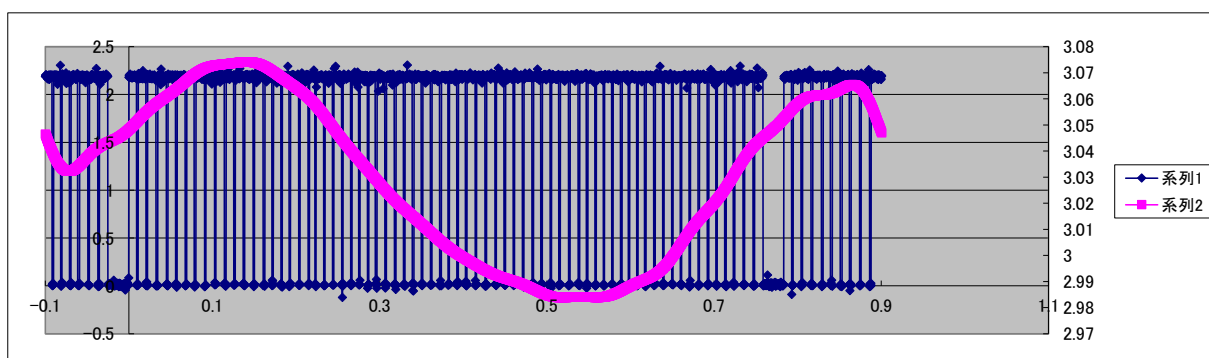


図 10 Excel 上で確認のために表示するノイズ除去後のデータとエンコーダの信号

圧力の信号は、図 9 のように、Excel が備えた FFT と逆 FFT の機能を用いたローパスフィルタによるノイズカットをする。図 10 がノイズを処理した圧力信号とエンコーダの信号である。図 10 のデータから、Excel が備える VBA マクロで、エンコーダの On-Off の切り替わりのタイミングの信号だけを抽出し、PV グラフにしたものが図 11 である。抽出した信号にクランク角を割り当てれば、クランク角と容積の関係は別途計算で推定することが可能になる。先程、「紺色の信号の上下動が大きく間が空いている箇所」を「目安」というあいまいな表現にした理由は、実験装置のセッティング次第で若干のズレがあるからである。そのため抽出した信号にクランク軸を割り当てる際に、どのタイミングのデータを容積が最も小さくなるタイミングにするかは、実験装置を観察するなどして決定することになる。

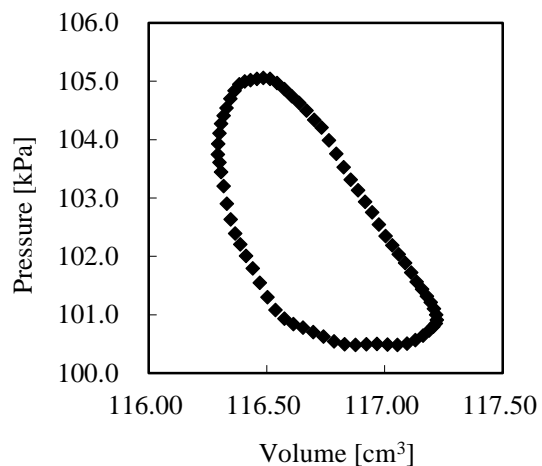


図 11 エンコーダの信号の On-Off 切り替え時のデータのみ抽出して作成した PV 線図

なお図 12 と図 13 はそれぞれ不適切なデータである．図 12 は時間分解能が荒いために，エンコーダーからの信号からクランク角を読み取ることができない．図 13 は圧力センサの信号の分解能を荒いものにしてしまい，圧力振幅の挙動を読み取ることができなくなっている．

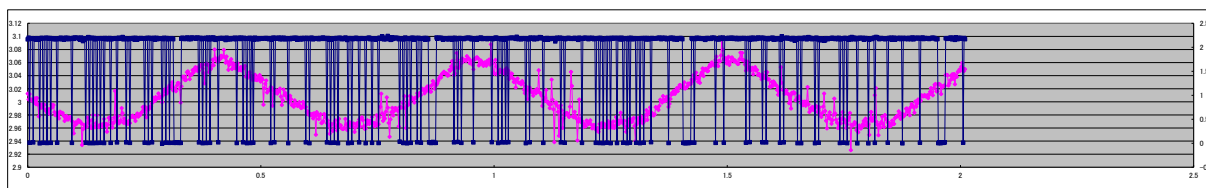


図 12 時間分解能が荒くて，遮光した回数とエンコーダーの信号の挙動が合わないデータ

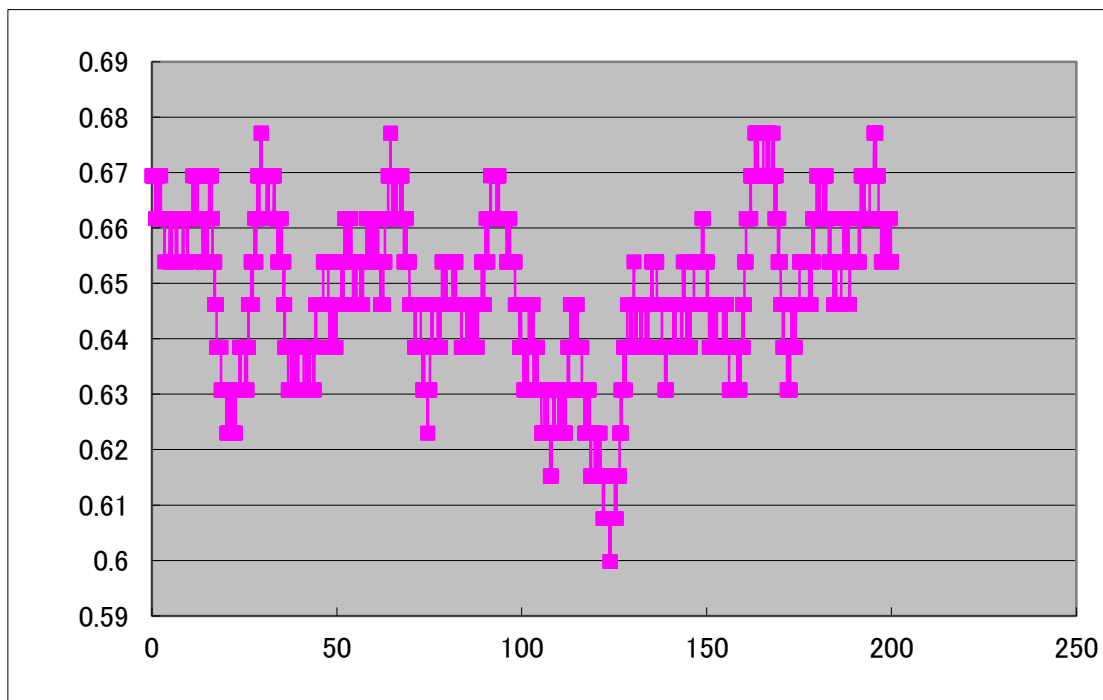


図 13 オシロスコープを 12bit ではなく 8bit にしてしまい，電圧の分解能が荒くなり，圧力振幅の挙動が読めないデータ

6. フーリエ変換について



図 14 音声を例にした横軸が時間で縦軸が信号の強さの散布図

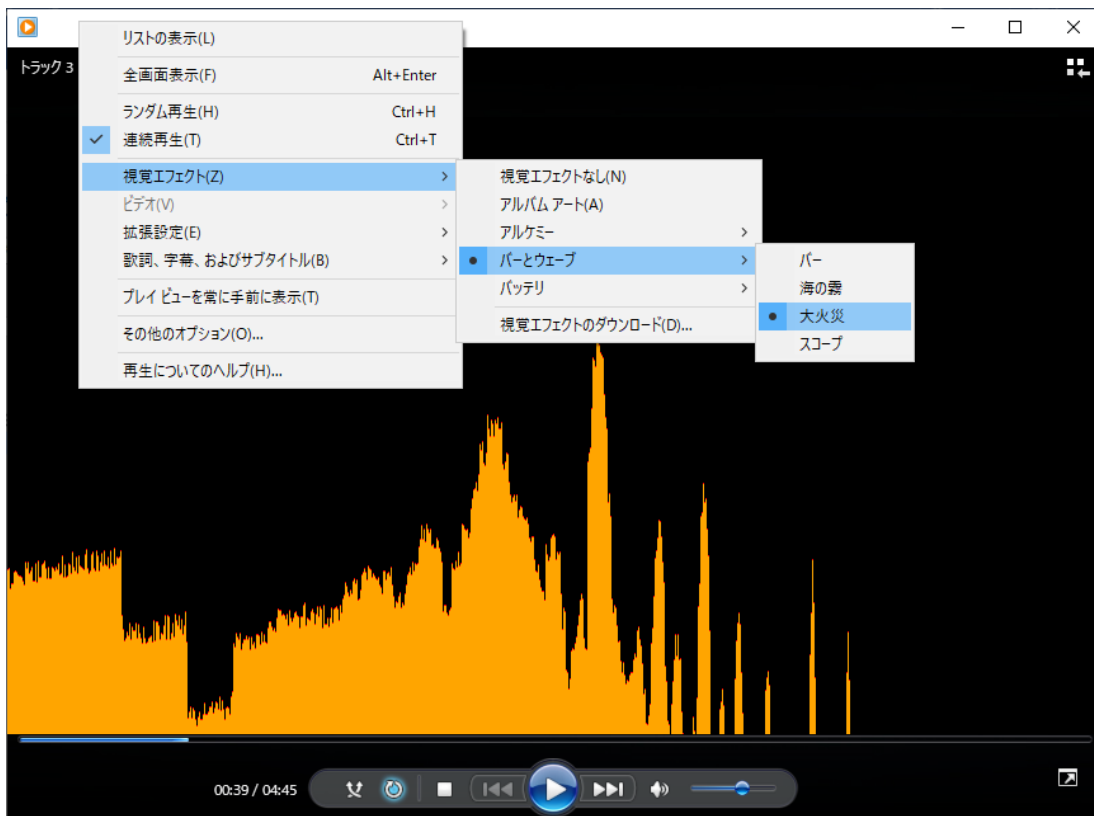


図 15 音声を例にした、横軸が周波数で縦軸が強さの棒グラフのようなもの

フーリエ変換の適切な説明はここでは行いません。ただ、音声为例にすると、図 14 のような横軸を時間縦軸を信号の強度とした散布図と、図 15 のような横軸を周波数帯毎の信号の強度で表示する棒グラフは、表示方法は異なるが同じようなデータを表示している。図 15 は、縦軸がフーリエ級数と相関があり、横軸の周波数が時間の逆数として時間との関りを持つ。図 5 および図 6 のようなグラフを作成するためのデータが収集できたら、第 1 回の授業は終了とする。

7. Excel ファイルを利用したデータ処理の例

「PV_DataProcess160202ArrangedForProjectSeminar20.xlsm」を用いて、FFT を用いたノイズ処理と、データの抽出を行う。

ファイルを立ち上げたら、マクロが有効になるようにしてください。

Sheet「概略チェック」に今回処理する測定結果のデータがあります。この Sheet で特に操作することはありません。

「作業 1」は、Sheet「FFT ver.170705」から始めます。セル B12 : C4107 が時間と圧力信号の生データを写したものです。最初にセル F10 に記載の指示に従って作業をしてください。「フーリエ解析出力範囲にデータがあります。ウンヌン」という警告が出ますが、[OK]を押してデータを上書きしてください。担当者加藤が試した PC では 8 分 50 秒後に F 列に結果が表示されました。（注：Windows Xp が動いていた古い PC だと、同じ作業が 90 秒程度で終わります。なお同じデータなので計算が終了しても、計算前と後で F 列の数値は変わりません。）

次の「作業 2」は、「作業 1」の計算結果が出た後に、セル M10 の指示に従って操作してください。元のファイルでは F 列から M 列へコピーした数値は、上はセル M12 から 11 個で、下はセル M4107 まで 22 個、と上下の数値の数があっていません。セル M12 から〇個とセル M4107 まで〇個の数を合わせ、その間の数値には「0（零）」を入力してください。G 列の対応する行に記載の数値が、ノイズ除去後のデータに反映される周波数になります。操作前のファイルであれば 1~10Hz ということでしょいか。

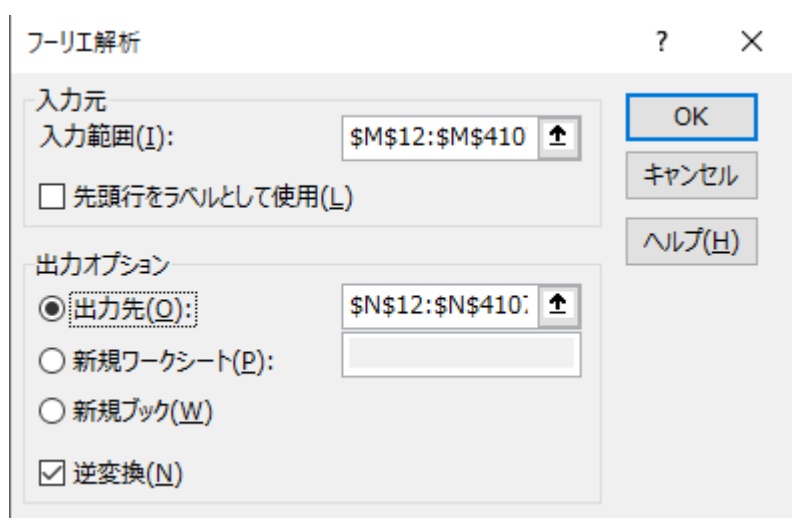


図 16 フーリエ解析の操作のウィンドウ

「作業 3」はセル N10 に記載の指示に従って「逆 FFT」を実行します。セル N10 の指示は不

明確ですが、「作業 2」の F10 の指示を参考に進めていくと、図 16 のウィンドウの左下に「逆変換 (N)」の欄があるので、チェックで選択する。このウィンドウで[OK]を押すと、しばらくして N 列に計算結果が表示される。N 列の数値は複素数で表示されるが、利用するのは実部を抽出した O 列の数値になる。また Excel ファイル上に図 9 と同じものがあるので、水色のデータがピンクのデータから外れていないことを確認しておく。ローパスフィルターの設定を極端なものにしても外れるが、それ以外では操作の誤り等でずれる。

「作業 4」として上述の「作業 2」の説明における G 列の数値、元ファイルであれば 10Hz はローパスフィルターの設定値でありパラメータになるので、記録しておく。

「作業 5」では Sheet 「SE のデータ処理用シート」上で PV 線図の作成と図示仕事の計算を行う。FFT と FFT の逆変換で処理した Sheet 「FFT ver.170705」のセル O12:O4107 の計算結果は、Sheet 「SE のデータ処理用シート」のセル C4:C4099 に「リンク貼り」付けされている。時間とエンコーダの信号のデータも Sheet 「SE のデータ処理用シート」の A 列と B 列にそれぞれリンク貼り付けされている。そこまでは Sheet 「SE のデータ処理用シート」のセル O2 に記載の作業になる。セル O3 に記載の指示に従って操作すると、VBA マクロによってデータが選択され、マクロによってなされた作業の結果が G 列から L 列に表示され、L 列より左側の計算に反映される。このセル Sheet 「SE のデータ処理用シート」における主要な計算結果は、BT8:BW21 の辺りに表示されているグラフおよびその近隣にあるピンクの背景の数値である。

「作業 6」では、この授業のためのデータを整理・保存する。図 5 や図 6 のようなグラフを作成するので、新たな Sheet または Book を開き、上記「作業 4」の数値をパラメータとして、ファイル「PV_DataProcess160202ArrangedForProjectSeminar20.xlsm」の Sheet 「SE のデータ処理用シート」から、セル BJ9:BJ80 を横軸の値、セル BL9:BL80 を横軸の値、図示仕事（注：PV 線図で囲まれた面積）の大きさをセル BM9 の値として保存する。いずれの値も、リンク貼り付けや数式ではなく、「形式を選択して貼り付け(S)」の「数値(V)」で保存する。

プロジェクトゼミ「熱機関の性能の評価」では、上記「作業 2」でコピーするセルの数を変更して上記「作業 2」から「作業 6」を 3 回程繰り返す。ファイル「190511.xlsx」が「作業 6」の成果物の一例である。

以上の作業が第 1 回の授業終了までに実施するのが目安となる。

なお <http://machls.cc.oita-u.ac.jp/kenkyu/netu/kato/kato1.html> から 2018 年・2019 年度の授業で使ったファイルがダウンロード可能である。このファイルを使用する場合は、文献[6]を参考文献としてください。

参考文献

- [1] Senft JR. An introduction to low temperature differential Stirling engines.1st ed. River Falls WI: Moriya press; 1996.
- [2] 兵働務 米田裕彦, スターリングエンジン—その生い立ちと原理—, パワー社 (1990).
- [3] Yoshitaka Kato, Indicated diagrams of a low temperature differential Stirling engine using flat plates as heat exchangers, Renewable Energy, Volume 85, January 2016, pp.973-980.
- [4] 加藤義隆, 研究会活動 紹介 A-TS 07-49 スターリングサイクル機器を題材にした実践的技

術者教育に関する研究会, 日本機械学会 エンジンシステム部門ニュースレターNo.62, 2019年8月31日.

- [5] 加藤義隆, An introduction to DIY by handicraft of a low temperature differential Stirling engine written in Japanese スターリングエンジンの手作りで DIY 入門, デザインエッグ社; 1 版 (2017), 168p.
- [6] 加藤義隆, 表計算ソフト Excel による LTD スターリングエンジンの指圧線図のデータ整理, 第 20 回スターリングサイクルシンポジウム講演論文集, 一般社団法人日本機械学会, (2017), pp.80.