

ローパスフィルタを用いた引張試験機のノイズ除去について

著者	芦澤 雅人
雑誌名	技術報告
巻	24
ページ	5-10
発行年	2019-03-20
出版者	静岡大学技術部
URL	http://doi.org/10.14945/00026792

ローパスフィルタを用いた引張試験機のノイズ除去について

芦澤雅人

静岡大学 技術部 教育研究第一部門

1. はじめに

本学の機械工学科の研究室で所有している2軸引張試験機：KBAT-100-SMHP（図1）を使用する際に発生するノイズが測定に悪影響を及ぼしている。その対策としてアナログフィルタを用いて、ノイズ信号の除去を行った。

方針としては、FFTによる周波数分布解析でノイズ信号の周波数帯域を明らかにし、フィルタの設計を行った。アナログフィルタには、抵抗やコンデンサ等の受動素子のみを用いたパッシブフィルタとオペアンプ等の能動素子を用いたアクティブフィルタの2種類を作製した。両者の性能を比較し、良い結果が得られたので報告する。



図1 2軸引張試験機

2. 原理

2.1 周波数解析について

周波数解析はフーリエ変換を用いた。フーリエ変換というのは、例えば、図1に示すような信号があったとする。これは周波数が10Hz、50Hz、80Hzの正弦波または余弦波の合成波である。

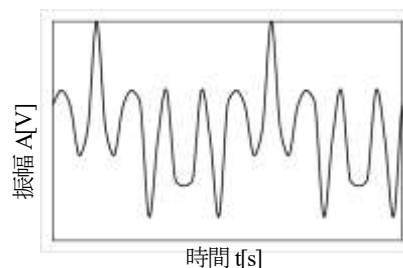


図1 10Hz、50Hz、80Hzの合成波の波形

図1からはこの波の周波数構成を知ることができないが、フーリエ変換によって時間領域から周波数領域への変換を行うことにより、図2の周波数分布のグラフが得られる(横軸は周波数で、左から10Hz、50Hz、80Hzのピーク)。

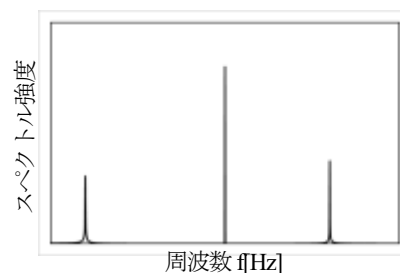


図2 図1の合成波の周波数分布

このように周波数構成が未知の波であってもフーリエ変換によって合成波の周波数構成を知ることができる。Excel のアドイン機能を用いて周波数解析を行った^[1]。また、元の波の振幅とフーリエ変換後の値を対応させるには、各フーリエ変換値をデータ数2 で割る必要がある。

2.2 フィルタについて

フィルタには抵抗やコンデンサ、コイル等の受動素子のみを用いたパッシブフィルタと、オペアンプ等の能動素子を用いてフィルタに電源を供給するアクティブフィルタの 2 種類がある。さらに、フィルタで取り出したいあるいは減衰させたい信号周波数領域をそれぞれ通過域、減衰域と呼び、これらの違いから「ローパスフィルタ」、「ハイパスフィルタ」、「バンドパスフィルタ」、「バンドエリミネーションフィルタ」の 4 つに分かれる。図 2(a)~(d)にそれぞれの周波数特性を表した模式図を示す。横軸が周波数、縦軸が電圧利得(入出力電圧の比)である。(a)は遮断周波数よりも低い周波数信号を通過させるローパスフィルタ(LPF)。(b)はローパスフィルタと逆で、遮断周波数よりも高い信号を通過させるハイパスフィルタ(HPF)。(c)は特定の周波数領域を通過させるバンドパスフィルタ(BPF)。(d)は特定の周波数帯以外を通過させるバンドエリミネーションフィルタ(BEF)である。遮断周波数とは、利得が約 70.07%(−3.010dB)になった時の周波数を指す。

100Hz までの通過域での利得(入出力の比)を 99.9%(−0.01dB)以上に保つという設計条件のもとで LPF を製作した。

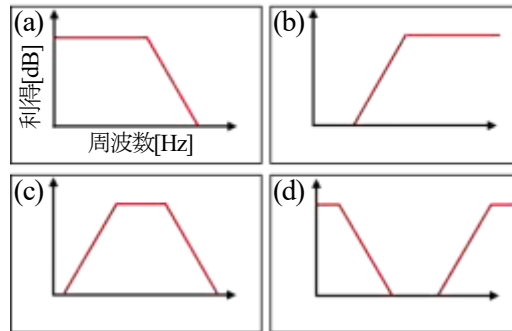


図 3 各フィルタの周波数特性模式図

2.2.1 パッシブフィルタ

設計したパッシブフィルタの回路図を図 4 に示す。

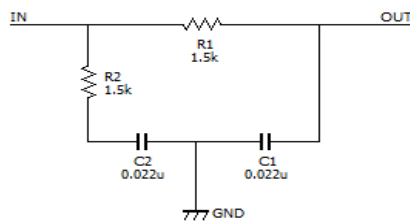


図 4 1 次 CR ローパスフィルタ回路図

これは 1 組の抵抗とコンデンサを用いた最も単純な LPF に加えて、さらにもう一組の抵抗とコンデンサを配置することでコモンモードノイズを低減している。

伝達関数は、

$$T(s) = \frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{s + \frac{1}{CR}} \quad (s \text{ は } s = i\omega) \quad (1)$$

となる。また、1 次 LPF の伝達関数の一般形は以下の(2)式となる。

$$T(s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \quad (2)$$

$\omega_c = 2\pi f_c$ であるので、遮断周波数は(3)式で表される。

$$f_c = \frac{1}{2\pi CR} \quad (3)$$

2.2.2 アクティブフィルタ

設計したアクティブフィルタの回路図を図5に示す。

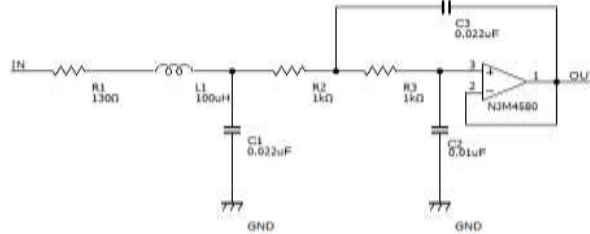


図5 アクティブフィルタの回路図

この回路はサレンキー型の2次ローパスフィルタである。サレンキー型のフィルタは、高い周波数ではオペアンプの出力インピーダンス増加により、ある周波数以上で利得が増加または一定になるという欠点がある。これを抑えるためには前段に適切なLPFを置く必要がある^[2]。今回はRC型よりも減衰傾度の大きいLC型LPFを採用した。LTspiceによるシミュレーション^[3]の結果、発振防止フィルタを入れない場合、450kHz付近から電圧利得が増加しているため、遮断周波数はこれよりも低い100kHzに設定した。後段のアクティブフィルタの遮断周波数は10kHzに設定した。正帰還型のアクティブフィルタの伝達関数は次の(4)式となる^[4]。

$$T(s) = \frac{K}{C_1 C_2 R_1 R_2} \frac{1}{s^2 + s \left\{ \frac{1}{C_1 R_2} + \frac{1}{C_1 R_1} + \frac{1}{C_2 R_2} (1 - K) \right\} + \frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2}} \quad (4)$$

ここで、2次フィルタの伝達関数の一般式は(5)式となる

$$T(s) = \frac{\omega_c}{s^2 + \frac{\omega_c}{Q}s + \omega_c^2} \quad (5)$$

(4)式と(5)式から以下の(6)式、(7)式が成り立つ。

$$\frac{\omega_c}{Q} = \frac{1}{C_1 R_2} + \frac{1}{C_1 R_1} + \frac{1}{C_2 R_2} (1 - K) \quad (6)$$

$$\omega_c = 2\pi f_c = \sqrt{\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (7)$$

サレンキー型のフィルタでは、オペアンプはボルテージフォロワとして使用しているため、 $K=+1$ である。ここで $R_1 = R_2 = R_f$ とすると、

$$2Q = \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} \quad (8)$$

さらに、 $C_1 C_2 = C_f^2$ とおくと、 C_1 と C_2 は以下の(9)式で求めることができる。

$$C_1 = 2QC_f, \quad C_2 = \frac{C_f}{2Q} \quad (\text{ただし、} C_f = \frac{1}{\omega_c R_f}) \quad (9)$$

また、通過域の平坦性を考慮してバターワース特性で設計したため、 $Q=0.707$ とした。

3. 測定結果

3.1 パッシブフィルタ

パッシブフィルタの電圧利得と周波数の測定結果を図6に示す。

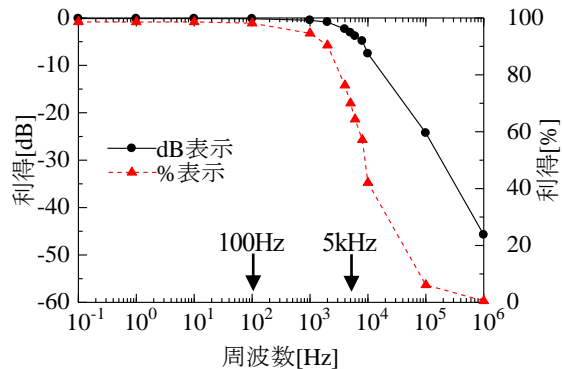


図6 パッシブフィルタの周波数特性

前述した 100Hz までの利得が主な設計条件であるが、遮断周波数については 100Hz の 50 倍の約 5kHz に設定したが、これは 100Hz と十分に離れているため、遮断周波数の付近の減衰の影響はないと判断した。遮断周波数の計算値は(3)式を用いると、 $f_c \approx 4.8\text{kHz}$ となる。

測定結果と比較すると、5kHz で電圧利得が 70% となっているため、遮断周波数の計算値と 3% 程度のずれはあるが、概ね設計通りの特性となった。今回は通過域の電圧利得と平坦性を重視していたため、遮断周波数の正確性については考慮していなかったが、100Hz 近傍に遮断周波数を定める場合は、遮断周波数を正確に求め、100Hz で利得が減少しすぎているかを測定する必要がある。また、100Hz までの電圧利得は 100Hz で 98.2% となるが、これは設計条件の 99.9% の電圧利得を保持する条件を満たしていない。

次に FFT を用いた周波数分布の測定結果と測定波形をそれぞれ図7、図8に示す。

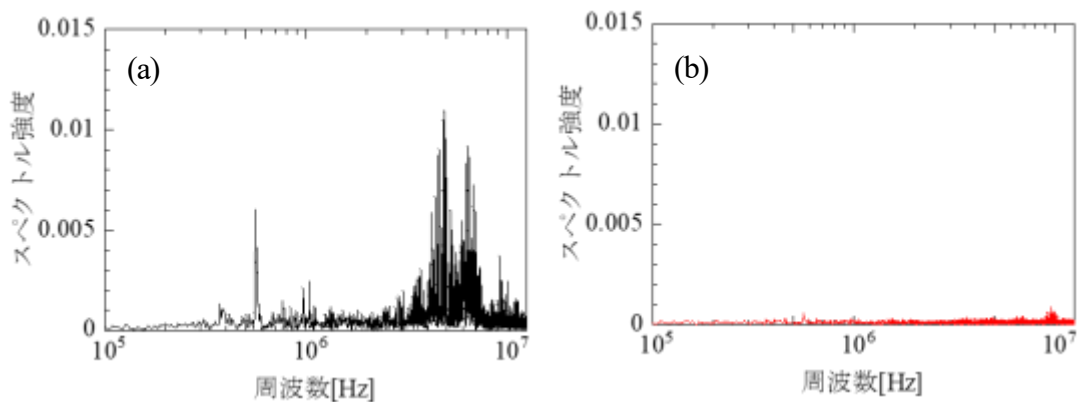


図7 信号の周波数分布(a)フィルタ無し(b)フィルタ有り

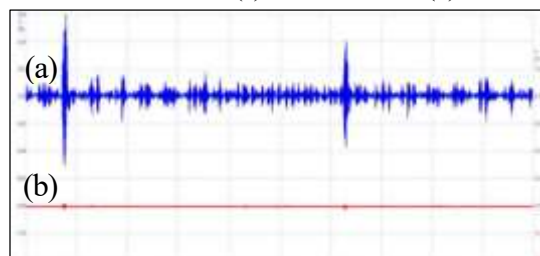


図8 測定波形(a)フィルタ無し(b)フィルタ有り

測定は運転準備のみを入れた状態で行ったため、図7(a)に周波数分布図に表れている振幅スペクトル強度の高い部分はノイズ信号によると考えられ、これらは主に 4MHz~10MHz と 600kHz 付近にも一部存在していることが分かる。図7のフィルタの有無で周波数分布を比較すると、フィルタを通過させることによりこれらの帯域のスペクトルが除去できていることが分かる。図8(a)のフィルタ無しの波形ではスパイクノイズのような波形が存在しているが、(b)のフィルタ有りの波形にはこのような波形はほとんど見られ

ない。縦軸のスケールは同一であるので、測定波形からもノイズが除去できていることが確認できる。さらに図7と図8を比較することで図8(a)にあるようなノイズはフィルタを通過させることにより図8(b)のような波形となるため、このノイズと思われる波形の周波数帯域は主に4MHz以降に存在していることが分かる。

3.2 アクティブフィルタ

アクティブフィルタの電圧利得と周波数の測定結果を図9に示す。

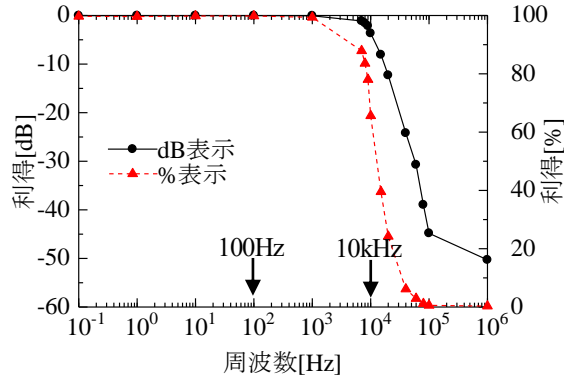


図9 アクティブフィルタの周波数特性

遮断周波数は10kHzであるが、利得が約70%となる測定点はない。しかし、測定結果から9kHzと10kHzの間の周波数に遮断周波数が存在すると考えられる。10kHzからのずれはあるものの、そのずれは数百Hz程度であるので、今回の目的には大きく影響しないと考えて良い。遮断周波数の計算値は(6)式を用いると、 $f_c \approx 10.7\text{kHz}$ となる。また、100Hzまでの利得については、最大で0.3%の減衰となっているため、パッシブフィルタと比べると設計条件に近づくことが分かる。

次に周波数分布の測定結果と測定波形を図10、図11に示す。

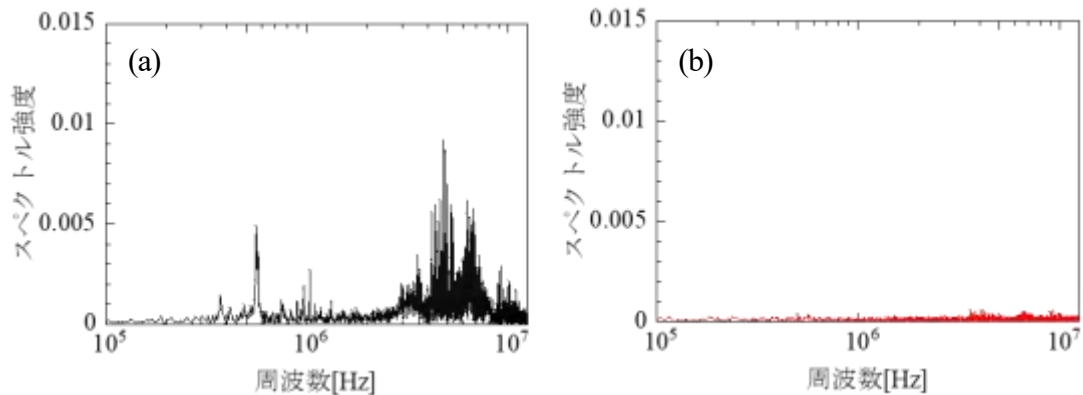


図10 信号の周波数分布(a)フィルタ有(b)フィルタ無

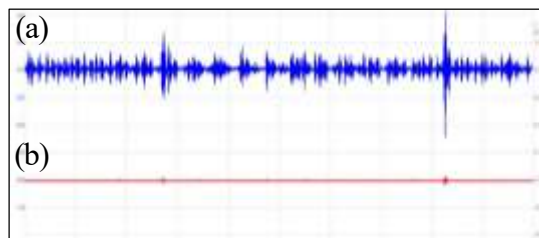


図11 測定波形(a)フィルタ無し(b)フィルタ有り

こちらについては、パッシブフィルタと同様の結果を得ることができた。

4. まとめと今後の予定

今回製作したフィルタでは、100Hz までの利得が 99.9%以上という設計条件を満たすことはできなかった。しかし周波数特性の結果からはアクティブフィルタの方が通過域での信号の減衰が比較的小さく、設計条件に近いという結果が得られたため、今後の方針としては引き続きアクティブフィルタの回路設計を行い、設定条件を満たすフィルタを作製する。具体的には、オペアンプをボルテージフォロワとしてではなく、通過域利得の減衰が発生しないようにゲインを調節することを考えている。

参考文献・引用文献

- [1] 構造解析と Excel を用いた科学技術計算の(有)ゴッドフット企画：
「エクセルを用いたフーリエ変換(FFT)」, < <http://godfoot.world.coocan.jp/fourier-transform.htm> >
(2018 年 10 月 19 日データ取得)
- [2] 「トランジスタ技術」CQ 出版社(2016, 5 月号), p104-p105
- [3] 神崎康宏：「電子回路シミュレータ LTspice 入門編」CQ 出版社(2009)
- [4] 今田悟, 深谷武彦：「実用アナログ・フィルタ設計法」CQ 出版社(1989), p34-p40