【報告】

単発・短周期騒音発生機器の信号解析とその低減に関する研究

機械電子科　　竹居　翼*　本多正計　飯塚千佳世

A Study on Noise Reduction and Analysis of Transient Sound from Industrial Equipments

Tasuku Takei, Masakazu Honda and Chikayo Iizuka

The FFT analysis is a general method for the frequency analysis. But it cannot analyze the non-stationary and transient signal. So we examined the feature about three different types of analysis that were able to analyze the non-stationary and transient signal, and the analyzer was developed. We analyzed the non-stationary noise that emitted from the axial piston pump with this software. As a result, the change in the non-stationary noise by the improvement of the axial piston pump was clearly caught.

１．はじめに

現在までに、産業機器から発生する騒音を低減させるための様々な研究がされており、一般的な防音カバーや吸音材貼付のほか、動的制御など多くの低騒音化対策[1)]が考案されている。しかし、最適な騒音対策としての確立には至っていない。この原因の一つとして、現在一般的に用いられている騒音計等による定常的な騒音評価では表現が困難な、単発音や短周期音等の非定常的な音の存在が考えられる。そこで本研究では、これら非定常的な音を解析・評価する手法について検討を行い、これらの解析が可能なソフトウェアを開発した。そして、開発したソフトウェアを使用して騒音対策の効果を確認することを試みた。

本報告では、まず非定常信号解析手法の検討として、短時間フーリエ変換（以下、STFT: Short-Time Fourier Transform）による解析、ウェーブレット変換による解析、デジタルフィルタバンク[2)]を用いた解析（以下、フィルタバンク解析）のそれぞれについて、既知の信号を対象に特徴を調べた。この解析に関わる数値計算、および解析結果のグラフ化は数値計算ソフトウェアのScilab[3)]を利用し、解析ソフトウェアの開発はScilab上での実装とした。そして、開発したソフトウェアを用いてプランジャーポンプの騒音解析を行い、対策への活用を試みて、その効果を確認した。

２．非定常信号解析手法の検討とソフトウェア開発

２.１　STFTによる解析

周波数解析で一般的なフーリエ変換は、解析信号内の周波数情報を得る代わりに時間情報が失われてしまう。そのため、時間と共に信号の周波数成分が変化する非定常音を対象にすると、信号に含まれる周波数成分の時間変化を捉えることができない。これを補うため、解析対象の信号を一定時間単位で分割し、それぞれをフーリエ変換することによって、時間情報を取り出すことのできる短時間フーリエ変換が考案された。しかし、単純に信号を切り出しただけでは、多くの場合に区間の始端と終端が不連続となり、フーリエ変換結果の誤差が大きくなる。そのため、切り出した信号に窓関数を掛け、区間の始端と終端の不連続を抑える対策を併用することが一般的である。だが、そもそも信号を切り出すことが誤差の一因のため、この誤差が少なくなるような最適な解析条件を見つけることが難しい。

２．２　連続ウェーブレット変換による解析

フーリエ変換を用いた解析では、解析条件に応じて周波数分解能および時間分解能は一意に定まる。しかしウェーブレット変換では、ウェーブレットと呼ばれる関数を時間軸上で伸縮させることにより周波数分解能を変化させることができる。また、同様にウェーブレットを時間軸上で平行移動させることにより、時間分解能を変化させることができる。こ

*）現　沼津技術専門校

のため、低周波数領域ではウェーブレットの時間幅が伸長して時間分解能が低くなり、高周波数領域ではウェーブレットの時間幅が収縮して時間分解能が高くなる傾向がある。

２．３　フィルタバンク解析

前述2種類の解析手法は、信号を時間領域から周波数領域に変換して時間情報を付加するのに対し、この解析手法は時間領域から直接、信号の周波数情報を取り出すことを行う。

この解析手法は、予め周波数幅を定めたバンドパスフィルタを複数用いて解析を行う。まず狭帯域のバンドパスフィルタの群（フィルタバンク）を構成し、このフィルタバンクに解析信号を掛ける。そして、得られたフィルタ毎の時間波形のそれぞれから包絡線を求める。この結果、解析信号の時間的な性質と周波数的な性質が同時に得られる。このため、時間領域で処理を行うために時間分解能が高く、狭帯域のバンドパスフィルタの特性に応じて周波数分解能が決まる特徴がある。また、処理の仕組み上、解析信号のデータ数とフィルタバンクを構成するフィルタ数に応じて計算量が大きく増減する。

２．４　非定常音解析ソフトウェアの開発

前述3種類の解析が行えるソフトウェアを開発するにあたり、数値計算ソフトウェアのScilab[3)]を利用した。使用したバージョンは5.3.1（64ビットWindows版）である。また、sndfile Toolbox 0.1-1、Scilab Wavelet Toolbox 0.1.11-1（swt）、およびScilabの信号解析関数を使用した。

STFT解析は、切り出される分析区間と掛ける窓関数の幅、および分析区間を切り出す間隔を任意に指定できるよう開発した。解析処理に使用するフーリエ変換、およびに窓関数の生成は、Scilab上のfft関数とwindow関数を使用し、窓関数の種類はハニング窓を選択した。

ウェーブレット解析は、連続ウェーブレット変換を使い、解析処理にはswtツールボックス中の関数を利用した。そのため、現状で使用可能なウェーブレットはツールボックスで対応しているものに限定される。今回は複素Morletを選択した。

フィルタバンク解析では、バンドパスフィルタの生成にiir関数を使用し、包絡線を求めるためにhilbert関数を使用した。フィルタは1次バタワース型のバンドパスフィルタを選択した。このフィルタのバンド幅は、振幅が$1/\sqrt{2}$倍となる周波数の上限と下限（カットオフ周波数）の差とし、フィルタによって生じる位相のずれの調整も行った。

２．５　それぞれの周波数解析法による解析結果

開発したソフトウェアを用いて、既知の信号に対する時間－周波数解析を行った。用意した信号は、時間の経過と共に周波数が単調に増加するチャープ信号、および断続的な単発音として作成したDTMF（Dual Tone Multi Frequency）信号である。

⑴　チャープ信号での解析結果

周波数が短時間で急峻に変化する信号の例として、周波数掃引速度40[kHz/s]のチャープ信号を0.1[s]用意した。時間波形を図1に、それぞれの解析結果を図2～4に示す。この信号は時間の経過とともに周波数が単調に増加する信号である。よって、解析結果としては1本の細い直線が正解であり、これに近いほど解析の精度が良いことを示す。図2より、STFT解析では信号の傾向は読み取れるが周波数と時間が曖昧であり、太い直線となって解析の誤差が大きいことがわかる。図2より、ウェーブレット解析では低周波数領域においては周波数と時間の変化がはっきりと確認できるが、高周波数領域になるほど不明瞭となることがわかる。図4より、フィルタバンク解析では時間の経過と共に周波数が単調に増加する傾向が鮮明に確認でき、短時間に急峻に周波数が変化する信号を解析する際に有効であることがわかる。

⑵　DTMF信号での解析結果

短時間に単発音が連続して発生する例として、0.025[s]のDTMF信号を0.025[s]の無音と交互に10回発生させた信号を用意した。これらの信号の時間波形を図5に、各解析を行った結果を図6～8に示す。この信号は2種類の周波数の組み合わせで構成されている。よって、発音時にのみ2つの周波数が現れる解析結果が正解となる。

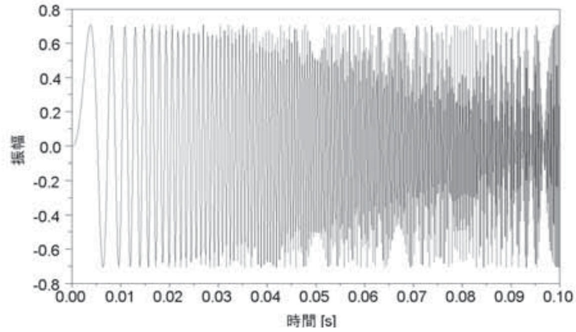

図１　時間波形（チャープ信号）

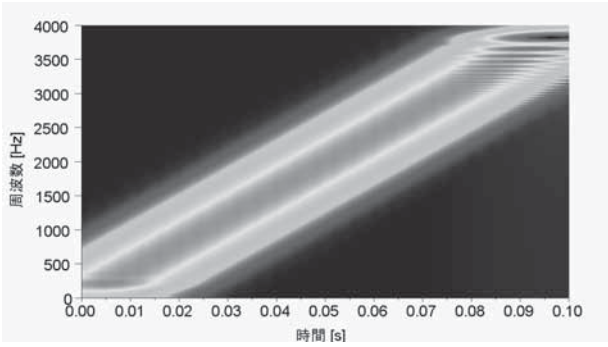

図２　STFT解析結果（チャープ信号）

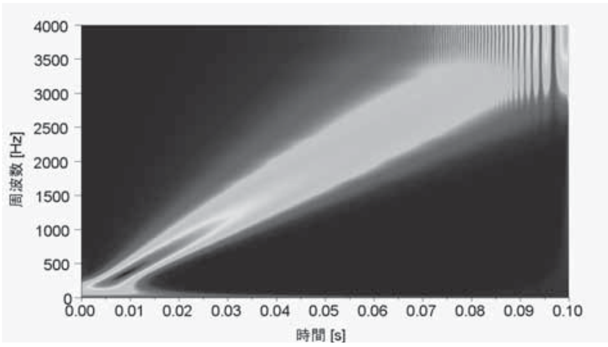

図３　ウェーブレット解析結果（チャープ信号）

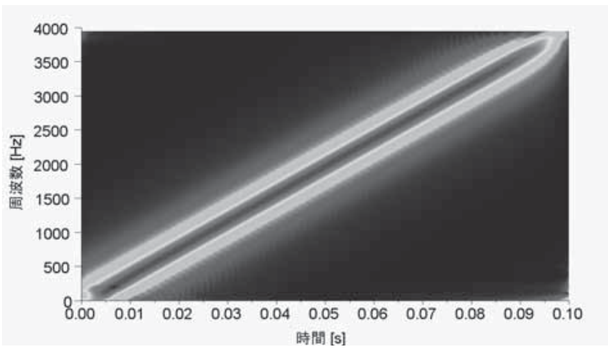

図４　フィルタバンク解析結果（チャープ信号）

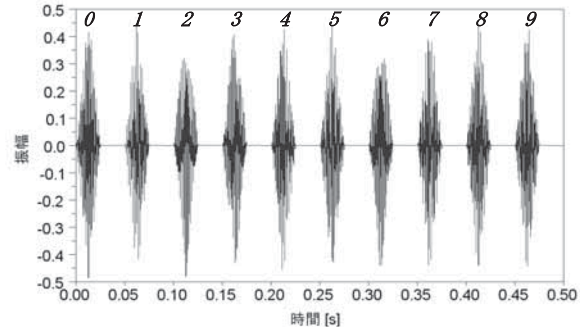

図５　時間波形（DTMF信号）

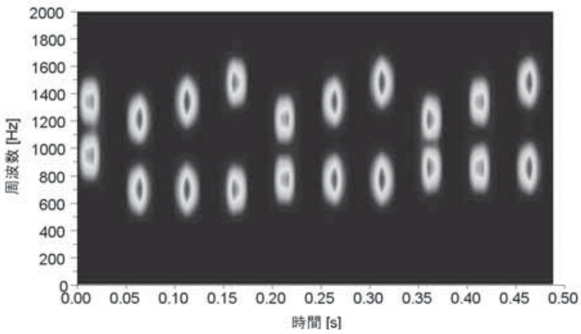

図６　STFT解析結果（DTMF信号）

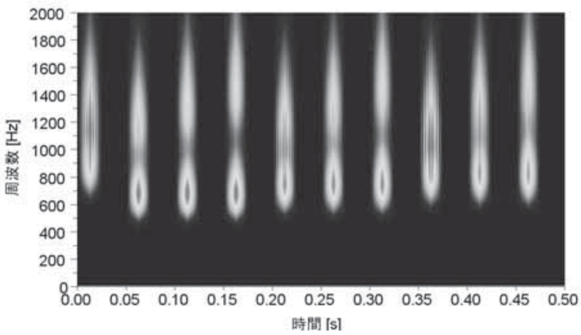

図７　ウェーブレット解析結果（DTMF信号）

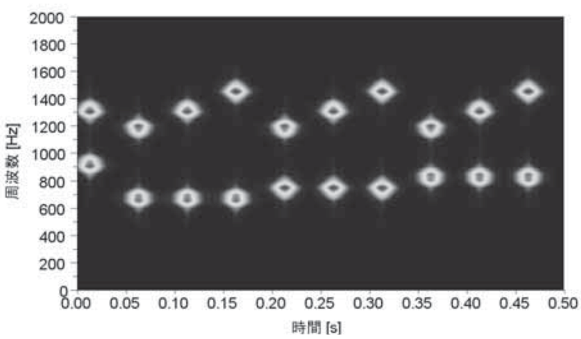

図８　フィルタバンク解析結果（DTMF信号）

【報告】

図６のSTFT解析では、発音時間の傾向は確認できたが、その周波数の幅が広く、曖昧にしか読み取れない結果となった。図７のウェーブレット解析は、発音時間は正確に読み取れるものの、２種類の周波数を分離できず、不明瞭な結果であることが確認できた。これに対して図８のフィルタバンク解析では、発音時間とその周波数が明確であり、短時間に連続する単発音を正確に解析できることが確認できた。

２．６　考察

STFT解析では、周波数の時間変動のおおよその傾向は掴むことができるが、近い周波数の変動を捉え切れない可能性がある。また、ウェーブレット解析では、周波数帯に応じて周波数分解能が異なってしまうため、解析で知りたい周波数によっては確認できない可能性がある。フィルタバンク解析では、短時間における周波数の時間変化と、音の発生時間を正確に捉えることができるため、非定常的な信号の解析に有用であることが確認できた。

３．開発ソフトウェアを用いたポンプの騒音解析

３．１　解析条件

キソー株式会社製のプランジャーポンプを対象として、動作時に発生する騒音について解析を行った[4)]。図９にポンプの外観、図10に騒音測定時のマイクロホンの位置を示す。また、表１にポンプの概要、表２に測定に使用した機器を示す。

表１　ポンプ概要

種別	アキシャルプランジャーポンプ
吐出圧力	3.5 [MPa]（定格値）
吐出流量	25.5 [l/min]（定格値）
駆動方法	三相誘導電動機をVベルトで接続
ポンプ回転数	1349 [rpm]（ノズル使用時定格値）
電動機回転数	1436 [rpm]（50[Hz]電源定格値）

表２　測定に使用した機器

データ収録機器	小野測器 データステーション DS-2100 小野測器 4ch入力ユニット DS-0264
マイクロホン	B&K コンデンサマイクロホン Type 4188
プリアンプ	B&K プリアンプType 2671

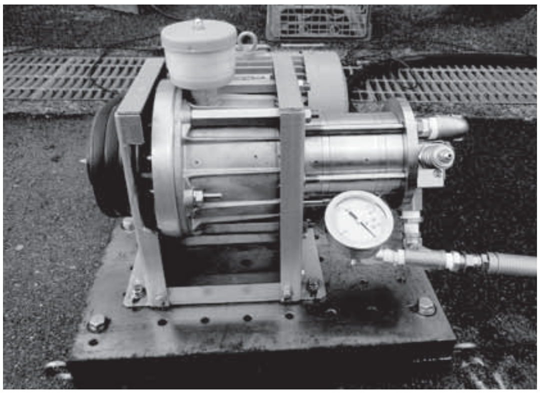

図９　ポンプ外観

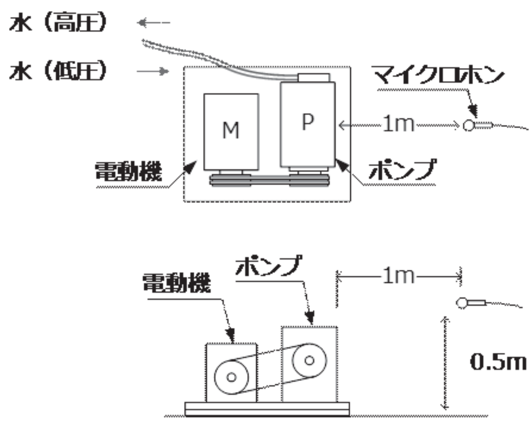

図10　騒音測定時のマイクロホン位置

３．２　解析結果

対策前後の騒音の時間波形を図11、12に示す。また図13、14のFFT解析の結果から、今回の騒音は、2000[Hz]程度までの周波数成分が多く、300[Hz]前後と1000[Hz]程度にピークが顕著であることがわかる。今回の対策では、ポンプ内の弁や水の流路の変更を行ったが、これらからその効果を確認することはできなかった。よって、開発したソフトウェアで2000[Hz]以下の周波数領域について解析を行った。この結果を図15～20に示す。

３．３　考察

対策前後の時間波形（図11、12）では、殆ど違いがわからないことが確認できた。STFT解析結果（図15、16）から、対策前後の差が不明瞭であり、周波数の時間変化を明瞭に捉えられないことが確認できた。また、ウェーブレット解析結果（図17、18）から、高周波数領域の音の発生時間は確認できたが、周波数は不明瞭であった。そしてフィルタバンク解析結果（図19、20）から、周波数と発生時間

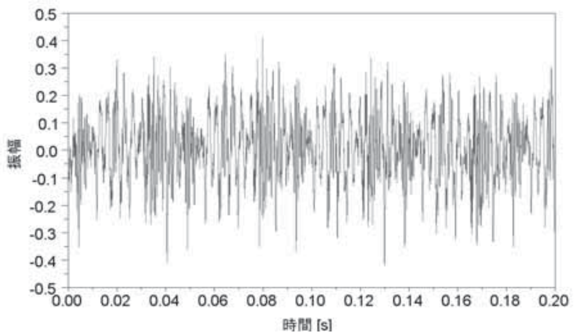

図11　時間波形（対策前）

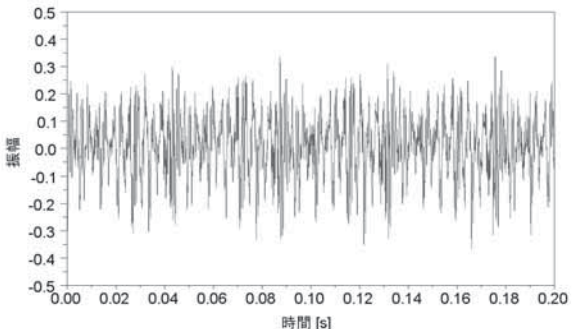

図12　時間波形（対策後）

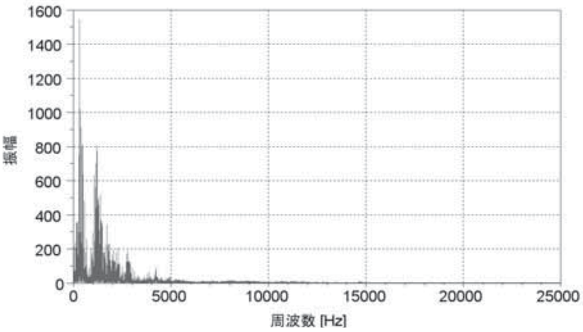

図13　FFT解析結果（対策前）

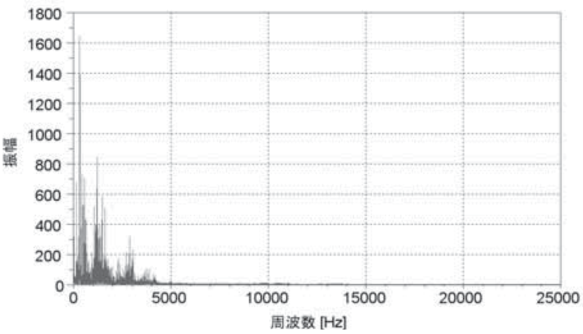

図14　FFT解析結果（対策後）

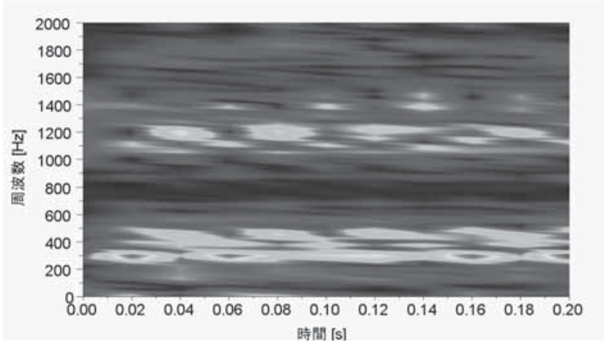

図15　STFT解析結果（対策前）

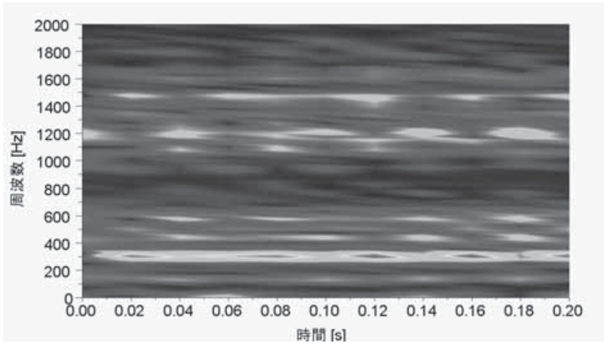

図16　STFT解析結果（対策後）

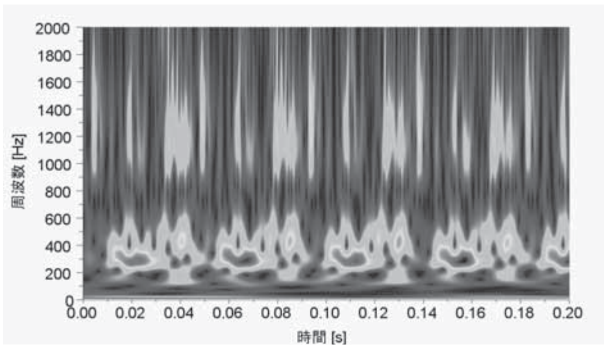

図17　ウェーブレット解析結果（対策前）

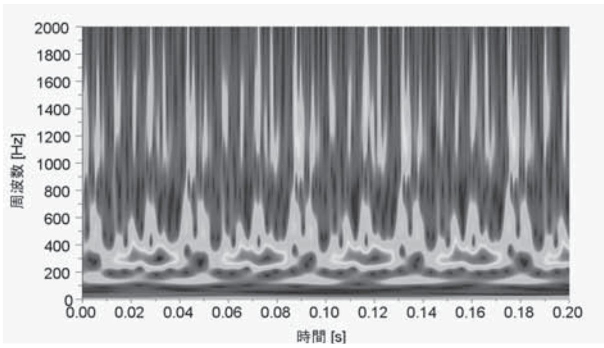

図18　ウェーブレット解析結果（対策後）

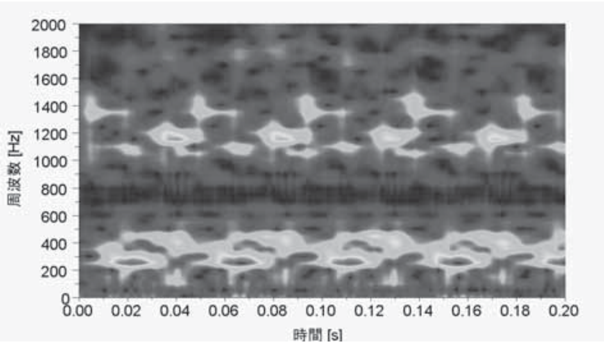

図19　フィルタバンク解析結果（対策前）

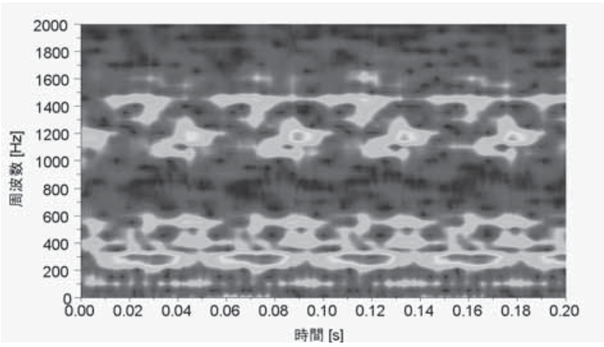

図20　フィルタバンク解析結果（対策後）

の両方を捉えることができ、対策前後の差を確認できた。よって、今回開発したソフトウェアを用いることで、対策による騒音の変化を詳細に確認できた。

４．まとめ

一般的に用いられているFFT解析では判別が難しい単発音等の非定常的な音は、フィルタバンク解析やウェーブレット解析を用いることで捉えることが可能であることを確認した。また、これら解析を取り入れて開発した本ソフトウェアを用いることで、騒音対策を施した効果の確認が可能となった。

謝辞

本研究に協力して頂いた、キソー株式会社の佐野氏、林氏、ならびに有限会社エヌブイソリューションズの菅原氏に深く感謝いたします。

参考文献

１）増田，大内，長田：可変容量形偶数ピストンポンプのアクティブ騒音制御に関する研究，日本フルードパワーシステム学会論文集，第34巻，第４号，p79-84，2003年７月.
２）菅原，山崎：過渡応答のデジタルフィルタを用いた周波数解析手法，日本機械学会2008年度年次大会講演論文集⑸，p.141-142，2008.
３）Scilab：http://www.scilab.org
４）竹居，本多，望月，飯塚：単発・短周期騒音発生機器の信号解析とその低減に関する研究，静岡県工業技術研究所研究報告，第３号，p69-70，2010.