

## パソコンによる周波数応答測定に及ぼす外乱の影響

近藤 勝也・久保 智子\*1・宮部 祐輔\*1・楠原 重和\*2

An influence of disturbances on frequency response measurement by a personal computer

Katsuya KONDO, Tomoko KUBO, Yusuke MIYABE, Shigekazu KUSUHARA

We compared measurement of frequency response using a time-stretched pulse (TSP method) and that using maximum-length sequence (MLS method) by computer simulation. First of results, if there were no disturbances in measuring system the both method can measure accurately frequency response without remarkable difference between both. Next, errors in analog-input-output device had a small influence on TSP method, but had a large influence on MLS method. More, disturbances in measured object such as random noise, sinusoidal noise or nonlinear element, had larger influence on TSP method than on MLS method. Finally, the features of the previously measured frequency response using TSP method are well simulated by including plural disturbances.

### 1. はじめに

音響システムや制御システムの研究分野において重要な検討項目の1つに周波数応答(もしくは周波数特性)の測定がある。筆者らの研究室ではこの周波数応答をパーソナルコンピュータ(パソコン)で測定する方法について検討してきた<sup>1)~4)</sup>。今迄の研究の経緯に沿って、研究内容と課題を述べる。

まず実際の測定では、測定対象にインパルスを入力し、その出力であるインパルス応答を周波数解析する方法がよく使われる。しかし、純粋なインパルスはエネルギーが小さいため、信号雑音比が悪くなるという欠点がある。これを改善するため、入力信号のエネルギーを大きくする方法がいろいろ研究され、代表的な方法としてTSP法とM系列法が確立されている。前者はインパルスを時間軸上で引き伸ばしたパルス(Time-stretched pulse : TSP)を用いることにより<sup>1)</sup>、また後者はM系列(Maximum-length sequences)と呼ばれる白色性の疑似ランダムノイズを用いることにより<sup>2)</sup>、それぞれ信号のエネルギーを増大させている。本研究室では、TSP法とM系列法に関する参考文献を整理し、高等専門学校の卒業研究で利用しやすいようにまとめると共に、数式処理ソフトMathcadによる計算プログラムで処理手順を記述した。

つぎに卒業研究<sup>3)</sup>においてTSP法による周波数応答測定プログラムを、アナログ入出力装置を備えたパソコンに実装し、ローパスフィルタ(LPF)とサーボモータ速度制御系の周波数応答を測定した。その結果、LPFの測定ではほぼ理論通りの結果が得られたものの、サーボモータ速度制御系の測定は不満足なデータしか得られないという結果に終わった。その原因は測定におけるいろいろな外乱の影響と推定されたので、これを明らかにするため、TSP法による周波数応答測定をシミュレーションするプログラムを作成した<sup>4)</sup>。

以上が筆者らの研究室における今迄の検討経緯であるが、その後シミュレーションによっていろいろな外乱の影響を検討したので、その結果について本論文で報告する。測定対象は理論式が分かっているLPFのモデルを用い、周波数応答の測定方法はTSP法に加えてM系列法を追加し、2つの測定方法による違いを比較検討した。外乱としては、アナログ入出力装置のエラー、アナログ信号のランダムノイズ、サーボモータ速度制御系の正弦波ノイズと非線形性を取り上げた。最後に以前にTSP法で実測されたサーボモータ速度制御系の周波数応答結果が、これらの外乱の存在を加えることにより再現されるかどうかを調べた。

\*1 ; 情報工学科平成18年度卒業生

\*2 ; 同19年度卒業生

2. シミュレーション

2.1 シミュレーションモデル

パソコンを用いた周波数応答測定装置構成を図1に示す。パソコンでTSPやM系列の入力信号を作成した後、アナログ入出力(AIO)ボードによってアナログ信号に変換(D/A変換)して、測定対象に測定信号として入力する。次に測定対象であるLPFやサーボモータ速度制御系からの出力信号をAIOボードによってデジタル信号に変換(A/D変換)する。パソコンではその出力信号と先の入力信号から計算された逆フィルタを用いて、畳み込み演算をして周波数応答を求める。この測定のシミュレーションは、パソコンの内部はデジタル信号、AIOボードより外側はアナログ信号を計算するモデルとなる。

つぎに図1に基づいてシミュレーション計算する方法を説明する。TSPを用いた周波数応答測定モデルは前報<sup>4)</sup>

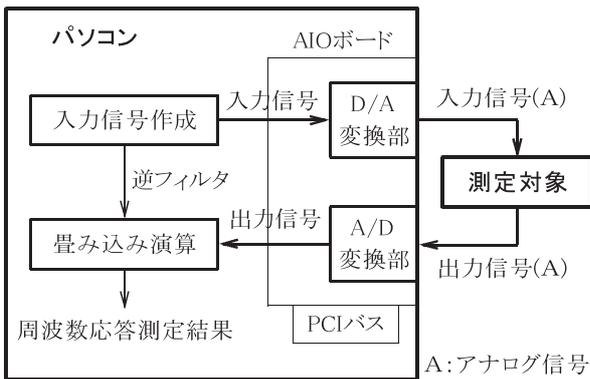


図1 周波数応答測定装置構成

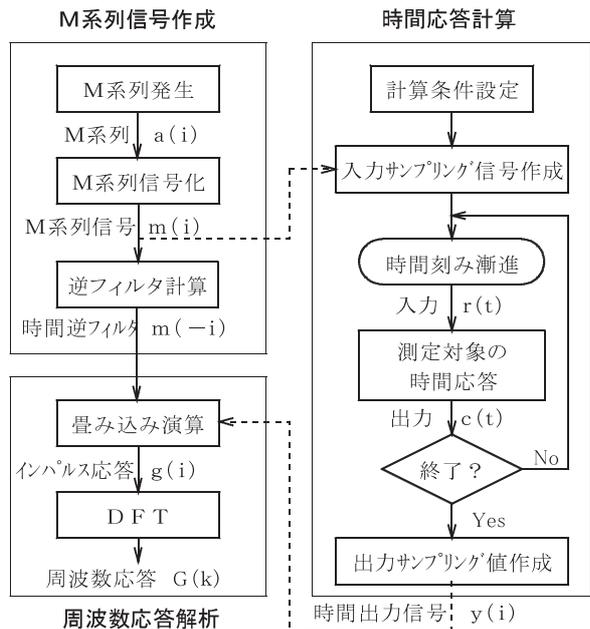


図2 M系列法による周波数応答測定計算モデル

の図1に書いたもので、ここではM系列を用いた周波数応答測定モデルを図2に示した。前報と比べ、図の左側のM系列信号作成部と周波数応答解析の計算が異なる。計算内容の詳細は既に説明した<sup>2)</sup>通りである。なお図中の変数  $i$  は離散時間の番号を示し、前報図1では  $i$  の代わりに記号  $n$  が使用されている。すなわち本報告の  $i$  と前報の  $n$  は同じものである。また、図2右側の時間応答計算部はTSP法とまったく同じである。

2.2 計算条件

計算条件として、シミュレーションに使用した主な数値を説明する。詳細な計算内容は既報<sup>1)~4)</sup>を参照されたい。

(1) 時間応答計算

図2の時間応答計算の主な条件を表1に示した。AIOのサンプリング周波数はサンプリング定理に基づいて(計算モデルに含まれる最大周波数の2倍)に設定されるのが通常であるが、ここでは実験で用いたAIOボードのサンプリング周波数の上限値を使用した。

次に応答計算の時間刻み周波数は、事前に以下の検討をした上で、前記サンプリング周波数と同じ値を使用した。すなわち、シミュレーション計算の時間刻みを更に細かくすると計算精度が向上するという考え方があるので、応答計算の時間刻み周波数を上げて計算してみたが、目立った精度向上は見られなかった。

最後に、今回のシミュレーションはサーボモータ速度制御系における測定の課題を検討することが目的であるが、測定対象のモデルは理論式が分かっているLPFにした。特性が既知のLPFにいろいろの外乱を追加することにより、それら外乱の影響を調べた。LPFは前報<sup>4)</sup>と同じ4次バターワース型で、そのカットオフ周波数は実験で使用したLPFに合わせて1kHzとした。

(2) 入力信号

図1のパソコンで作成されるTSPやM系列の条件を表2に示した。TSP信号の長さ(TSP長)とM系列信号の長さ(周期)はほぼ同じ点数で、サンプリング周期毎にアナログ信号に変換して測定対象に入力する。いずれの方法もこの長さを1周期とする繰り返し信号であるとして周波数応答の計算が導かれている。これを測定で実現するため、

表1 時間応答の計算条件

項目	使用値
AIOのサンプリング周波数	100kHz
応答計算の時間刻み周波数	100kHz
LPFのカットオフ周波数	1kHz

表2 入力信号の計算条件

項目		使用値
TSP	TSP長	4096点
	引き延ばし量	1024点
	円状シフト量	1024点
M系列	次数	12次
	周期	4095点(2 <sup>12</sup> -1)
共通	入力信号の振幅	±1もしくは±5

2周期分の信号を測定対象に入力し、その出力信号のうち後半の1周期分を周波数応答計算に使用する。これにより、前半の1周期の出力信号が入力ゼロの状態からスタートすることによる計算誤差を回避する。

(3) 外乱

①アナログ入出力装置のエラー

パソコンを用いた実験で、アナログ入出力装置のサンプリング周波数がカタログ仕様の最大値に近づくとき誤動作が発生する傾向が見られた。その影響を調べるため、図3に示す2種類の誤動作を計算条件にした。図の上段は出力処理がサンプリング周期内に終わらないで次の周期にずれ込んでしまう場合で、ソフトウェアの処理遅れが原因と考えられる誤動作である。図の下段はサンプリング周期の精度が不十分なために出力が遅れてしまう場合で、主にハードウェアの精度不良が原因と考えられる誤動作である。いずれの誤動作も1回の周波数応答の測定中に複数回発生することを想定した。また、図はアナログ出力の説明であるが、アナログ入力でも同様の誤動作が起こりうると考えられる。

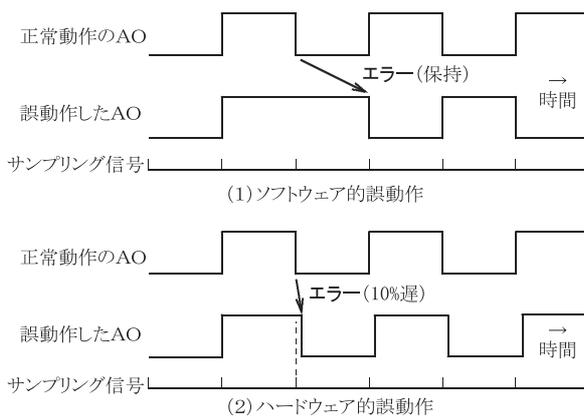


図3 アナログ入出力装置の誤動作

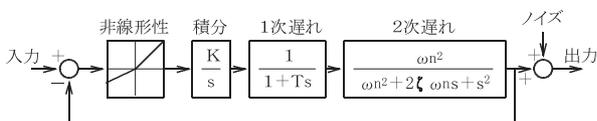
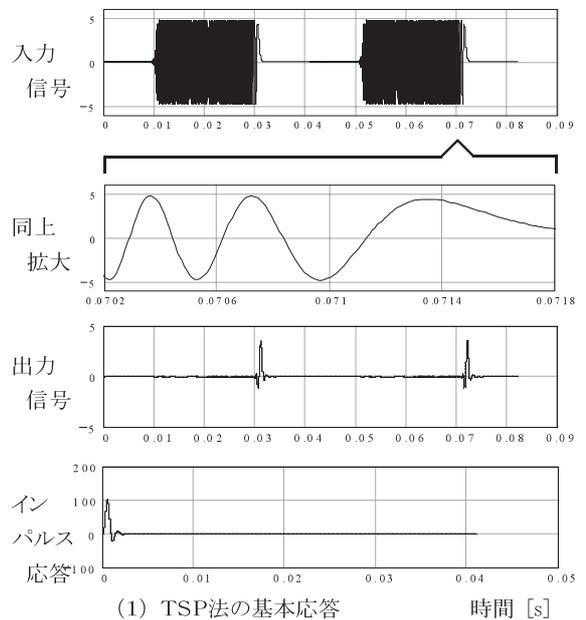


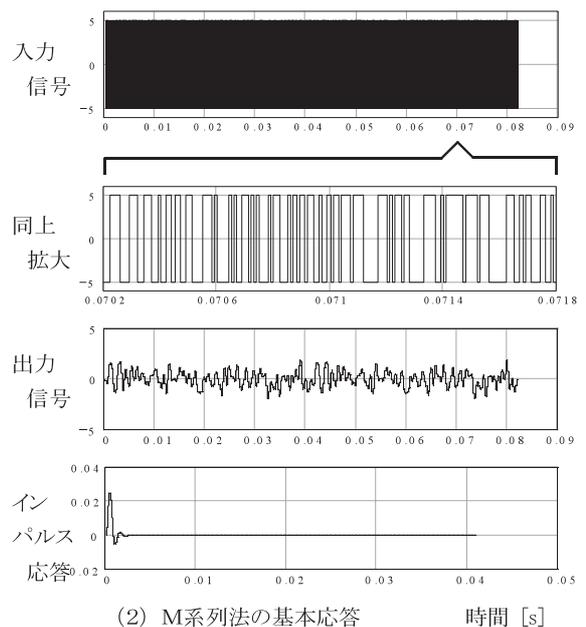
図4 外乱を含む測定対象のブロック線図

②測定対象に加わる外乱

パソコンのアナログ入力ボードより外側で測定対象に加わる外乱として、ランダムノイズ、正弦波ノイズ、非線形性を調べた。ランダムノイズは電子回路につきものの白色性雑音、正弦波ノイズはサーボモータや減速機などの回転に同期した単一周波数の変動、非線形性はサーボモータが発生しうるトルクが加速時と減速時で異なることが原因の外乱である。以上の外乱を考慮したブロック線図を図4に示す。図4のものは前報<sup>4)</sup>の図4に示した4次バターワースLPFのブロック線図で、その出力側に前記2種類のノイズを加算し、クローズドループの中に非線形性ブロックを追加した。



(1) TSP法の基本応答 時間 [s]



(2) M系列法の基本応答 時間 [s]

図5 周波数応答測定の基本応答

### 3. 外乱の影響の検討

はじめに基準の条件でシミュレーションした周波数応答の基本応答を示し、その上にいろいろの外乱を加えると周波数応答にいかなる影響が出るかを説明する。最後に以前のサーボモータ速度制御系で測定された精度不良を再現した結果について述べる。

#### 3.1 基本応答

外乱のない基準の条件でLPFの周波数応答を、TSP法とM系列法で測定した時の測定信号を図5に示す。それぞれ上から入力信号とその一部の拡大、出力信号、および計算されたインパルス応答の時系列信号である。

図5のインパルス応答を離散フーリエ変換(DFT)すると周波数応答が得られる。その振幅(ゲイン)のみを図6に示した。TSP法とM系列法ではほぼ同じ結果が得られており、ゲイン0dBの低い周波数から同-100dBになる周波数(20kHz程度)まで理論値と測定値が一致している。これから、外乱がなければ、TSP法とM系列法は同程度の精度で周波数応答が測定できるといえる。さらに高い周波数で理論値と測定値の間に差が出るのはLPFのモデル精度<sup>4)</sup>などが原因と思われる。なお、位相特性は理論値と測定値が全域の周波数においてほぼ一致していた。本報では、紙面の関係と測定精度が分かりやすいことから、振幅特性の計算結果のみを示して説明する。

#### 3.2 アナログ入出力装置のエラー

アナログ入出力装置のソフトウェア的誤動作が1回の測定中に6回発生した時の周波数応答を図7に示す。同様に

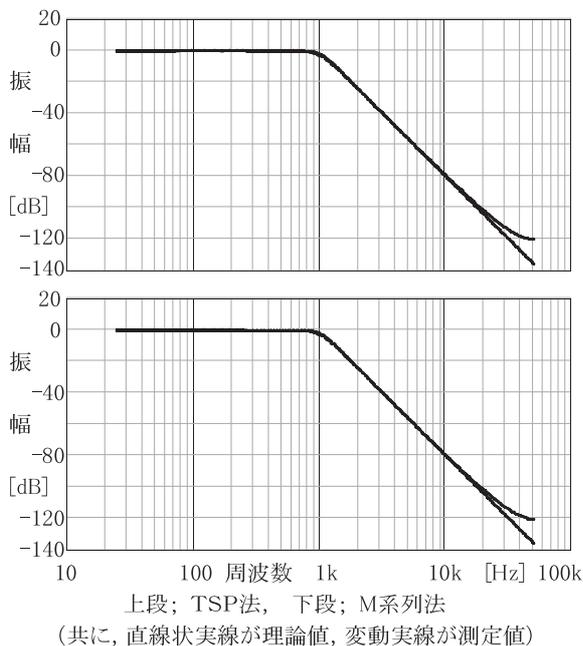


図6 基準の周波数応答測定結果

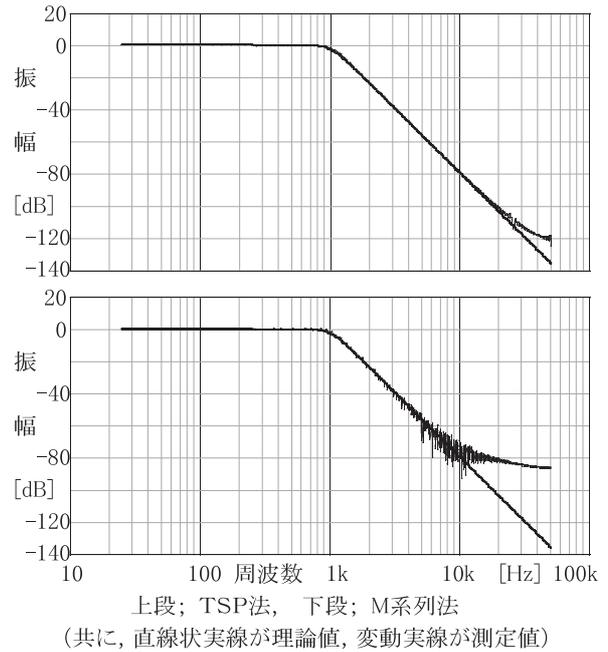


図7 ソフトウェア的誤動作の影響

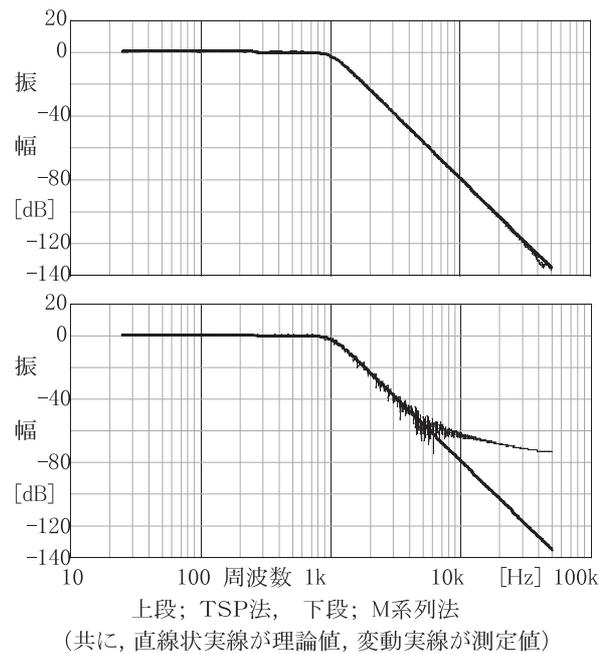


図8 ハードウェア的誤動作の影響

ハードウェア的誤動作が50サンプリング毎に合計160回、すなわちほぼ測定の全期間にわたって発生した時の周波数応答を図8に示す。上段がTSP法、下段がM系列法で、いずれも誤動作の条件は同じである。両図とも、TSP法はこれら誤動作の影響をほとんど受けないことが分かる。一方M系列法はハードウェア的誤動作の影響が大きく、ゲインが-70dB(図7)や-50dB(図8)以下に減衰する周波数領域では満足する測定結果が得られないことが分かる。

このように2つの測定法で影響が違う理由は、TSPは周波数が異なる正弦波の集合なのでアナログ出力の誤動作

で正弦波が大きく変形することが少ないが、M系列は異なる周期の矩形波の集合なので同じ誤動作によって周期そのものが変わってしまうためと考えられる。したがって、M系列法ではアナログ入出力装置のサンプリング周期の精度を高くすることが重要である。

### 3.3 ランダムノイズ

TSP法、M系列法ともに、振幅±1%(入力信号比)のランダムノイズを加えた時の周波数応答を図9に示す。振幅比±1%のランダムノイズはアナログ信号の分野では常識的な大きさである。図のTSP法では-40dB(=±1%に相当するデシベル値)以下の測定ができないというほぼ妥当な結果になった。一方、M系列法では約-45dB以下の測定ができないという結果になり、わずかではあるがTSP法よりランダムノイズの影響が小さくなった。その理由の一つとして、M系列信号は全測定期間中にわたって変化するため信号のエネルギーがTSP法より大きくなっていることが考えられる。

### 3.4 正弦波ノイズ

TSP法、M系列法ともに、周波数1kHz、振幅±10%(入力信号比)の正弦波ノイズを加えた時の周波数応答を図10に示す。図を見ると、TSP法のほうがM系列法より正弦波ノイズの影響を大きく受けるようである。すなわち、先ず外乱によって発生した周波数1kHzにおけるピークの高さを見ると、TSP法は約20dBであり、同約10dBであるM系列法のほうが小さい。次に同じ外乱のためにより高周波数において発生するノイズ成分を見ると、TSP法のほうがM系列法よりより低い周波数から影響を受け始めてい

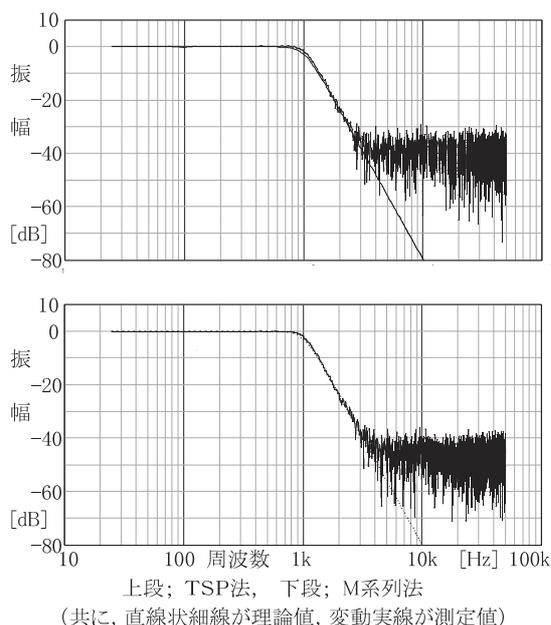


図9 ランダムノイズの影響

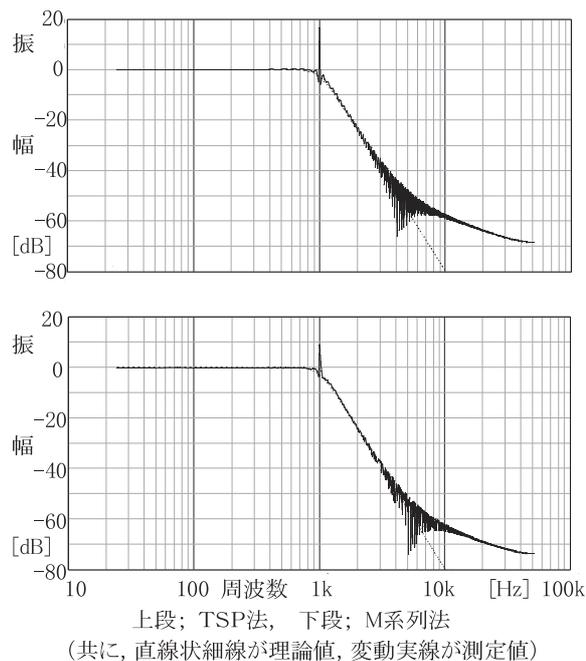


図10 正弦波ノイズの影響

る。この違いの理由は前節で述べたことに加え、TSP法は周波数応答の計算に周波数領域の畳み込み演算を行うのに対し、M系列法は時間領域の畳み込み演算を行うことが考えられる。

### 3.5 非線形性

TSP法、M系列法ともに、図4の非線形性を与えた、すなわち加速(プラス)側の勾配に対し減速(マイナス)側の勾配を0.5倍にしたときの周波数応答を図11に示す。上下段とも非線形性がない時の結果と共に示してある。図より、TSP法は非線形性の影響を大きく受けているが、M系

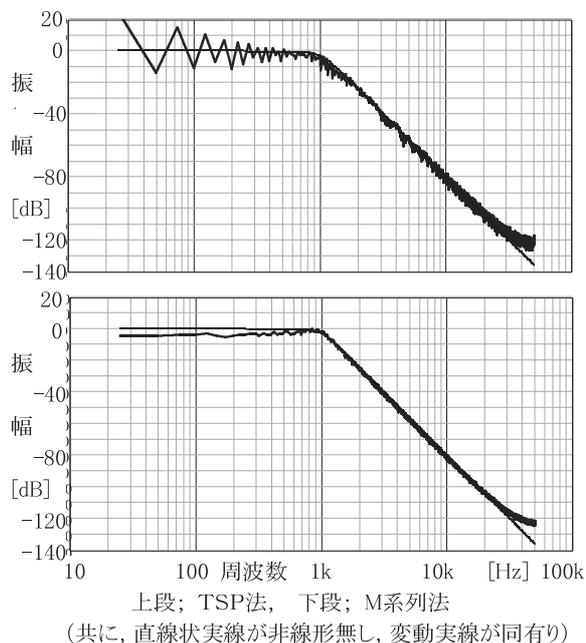


図11 非線形性の影響

列法はその影響が明らかに小さいことが分かる。なお念のため同じ非線形の下で、正弦波法(単一正弦波毎の入出力波形の比較)による周波数特性を計算したが、その結果はM系列法とほぼ同じになった。以上のことからM系列法は非線形性に対して有効であるといえる。

TSP法の測定値が低周波数領域で変化する原因を考察する。図5の波形を見ると、TSP信号の正弦波は、最低周波数の25Hzのような低い周波数では、一周期分全部を含むことができなくて一部分で代表していることが分かる。したがって、低周波数では非線形性に対して、プラス側の応答とマイナス側の応答のどちらが測定されるかで、振幅に大きな差がでると考えられる。

### 3.6 まとめとサーボモータ測定の再現

以上の計算結果から、TSP法とM系列法に対する外乱の影響をまとめると、アナログ入出力装置のエラーの影響はTSP法のほうがM系列法より小さい。このためM系列法においては精度の高いアナログ入出力装置が必要である。一方、ランダムノイズ、正弦波ノイズ、非線形性のようなパソコン外部の外乱の影響は、いずれもM系列法の方がTSP法より小さいことが分かった。特に非線形性の影響は両者の間に大きな差が出た。

表3 サーボモータ測定の推定外乱

項目	推定値
ランダムノイズ	振幅±1%
正弦波ノイズ	周波数:100, 300, 1k, 1.5k, 3kHz 振幅: いずれも±3%
非線形性	減速トルク=0.75×加速トルク

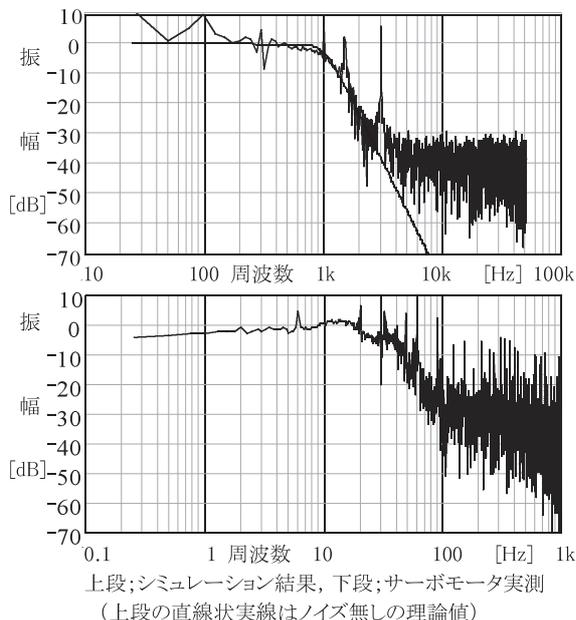


図1.2 サーボモータ測定の精度不良の再現

次に本シミュレーションのきっかけはTSP法によるサーボモータ速度制御系の測定結果の検討であった。その時に測定されたデータから推定される外乱を、今回のシミュレーションの条件に換算した値を表3に示す。この外乱をTSP法の測定に加えた時の周波数応答を図1.2の上段に示す。下段に以前の実測結果を示すが、細かな違いはあるもののサーボモータ速度制御系の測定結果が再現されたといえる。すなわち、当時のサーボモータには表3のような多くの外乱が含まれていたことがシミュレーションで確かめられた。

## 4. あとがき

TSP法による周波数応答測定とM系列法による周波数応答測定をシミュレーションにより比較した。その結果、外乱がなければ両者とも精度の良い周波数応答が得られ、両者の間に目立った差が認められなかった。次にアナログ入出力装置にエラーがあると、TSP法への影響は小さいが、M系列法は大きな影響を受けることが分かった。更にランダムノイズ、正弦波ノイズ、非線形性などの測定対象に付随した外乱があると、TSP法のほうがM系列法より大きな影響を受けることが分かった。最後に以前のTSP法によるサーボモータ速度制御系の実験で見られた測定データの精度不良は、上記外乱の総合的な影響によって再現されることが分かった。

今後の課題として、このシミュレーションを反映して周波数応答測定の精度を向上させることが上げられる。特にM系列法では、アナログ入出力装置のサンプリング精度を向上させることにより、周波数応答測定における外乱の影響を改善できる可能性がある。

## 参考文献

- 1) 近藤勝也, "TSPを用いた線形システムの周波数特性測定に関する調査", 奈良高専研究紀要, 39号, pp.73-78 (2003) .
- 2) 近藤勝也, "M系列を用いた線形システムの周波数特性測定に関する調査", 奈良高専研究紀要, 40号, pp.59-64 (2004) .
- 3) 近藤勝也, 中坊典史, 杉本真崇, "TSPを用いたサーボモータ速度制御系の周波数特性測定", 奈良高専研究紀要, 41号, pp.79-84 (2005) .
- 4) 近藤勝也, "TSPを用いた周波数応答測定のシミュレーション", 奈良高専研究紀要, 42号, pp.41-46 (2006) .