

## パソコンを利用した波形解析

西田 英樹\*・美坂 靖子\*\*

Hideki NISHIDA and Yasuko MISAKA: Waveform Analysis Using a Personal Computer

(1992年4月20日 受理)

### 1 はじめに

音声信号等のスペクトル分析は波形分析の一般的な方法として、サウンドスペクトログラフ等を用いて古くからおこなわれてきた<sup>1-3)</sup>。最近ではコンピュータの普及に伴い、これを用いた各種の波形分析法やそのための機器が開発され、有効な解析手段として定着している<sup>3-6)</sup>。

なかでもフーリエ変換を利用した信号処理はコンピュータに適した処理方法として発達し、マイクロコンピュータとソフトウェアを内蔵した専用のアナライザの出現などにより、音声を初めとする一般の振動解析に広く利用されるようになってきた。しかしながら現在でも本格的な解析システムはまだ一般的ではなく、優れた手法を様々な分野に適用する上で妨げになっている。

一方電子技術の発達により回路の集積化が進み、現在ではサンプル&ホールドやAD変換といった回路にとどまらず、フーリエ変換の計算さえも専用プロセッサを利用することにより簡単に実現できるようになった。またシステム全体の制御、管理にはパソコンを利用することができ、その結果各回路のタイミング制御や複雑なデータ処理の大部分はソフトウェアで解決することができる。

本報告では、ごく一般的なADコンバータを用いてパソコンに波形データを取り込み、さらにベクトルシグナルプロセッサを用いて高速フーリエ変換(FFT)を行ない、さらにその結果を種々の方法で表示するためのシステムを構築し、試用結果について検討した。このような手造りのシステムは柔軟性が大きく、しかも信号の特徴を比較的高分解能でしかも手軽に調べることができるため、音声に限らず歪波の周波数成分の分析やこれらの教育に適用するうえで有効である。

### 2 システムの構成

#### 2-1 ハードウェア

図1に、本研究に使用したハードウェアの構成を示す。パソコンには、9801 E (NEC) (RAM 640 kB 実装, クロック周波数 8 MHz) を使用している。

---

\* 技術教室

\*\* 鳥取市立江山中学校

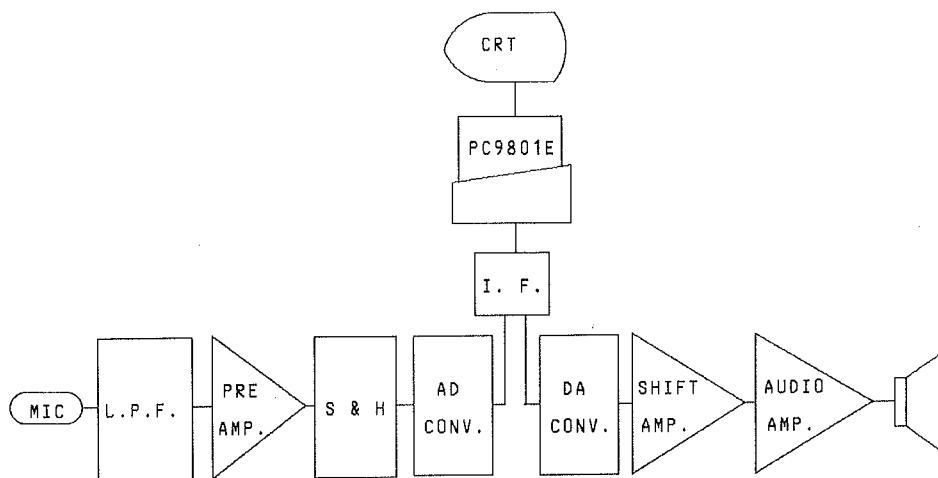


図1 ハードウェア構成

本システムではサンプル&ホールド IC LF398N (NATIONAL SEMICONDUCTOR) のアパーチャタイムが必ずしも充分短くないので、再現する信号の周波数上限を約 10 kHz に設定している。従って、FFT におけるいわゆるエリアシング (折り返し歪) を防止するために遮断周波数 10 kHz の L. P. F. をプリアンプの前段に挿入した。L. P. F. の回路方式には、バターワース型 4 次 L. P. F. を用いた。プリアンプで信号を増幅した後、約 5 V の直流電圧を加算し、AD コンバータの入力電圧範囲 (0-10 V) に整合している。

AD コンバータには 8 ビット逐次比較型の ADC825MC (DATEL) を用いた。この AD コンバータチップの変換時間は 1  $\mu$ sec である。DA コンバータには分解能 8 ビットの AD 558 (ANALOG DEVICES) を使用した。出力アナログ電圧は約 0.04 V ステップで出力される。

FFT の計算処理用としてベクトルシグナルプロセッサ (VSP) チップ ZR34161 を搭載した FLASH-16II (カノープス電子) をパソコンの拡張スロットに装着している。

## 2-2 ソフトウェア

ソフトウェアは、大きく分けて、波形測定用プログラムと、スペクトル解析および音声再生用プログラムによって構成されている。両プログラムとも、おもに N88 日本語 BASIC (MS-DOS 版) によるものであり、共に一部で機械語プログラムを呼んでいる。これらのプログラムはインタープリタ環境で使用される。

### 2-2-1 波形測定用プログラム

波形測定プログラムでは、波形の読み込みにあたって AD 変換時のサンプリング周期、連続測定時間等が設定されている。このプログラムの主な機能・特徴をのべる。

#### 1) サンプリング周期の調整

本システムで扱う信号周波数範囲は 0-10 kHz であるので、サンプリング周期は 50  $\mu$ sec が適切である。しかし、本装置では AD コンバータをマシン語プログラムでそのまま駆動した

ときの通常のサンプリング周期は  $11.9 \mu\text{sec}$  となり、これを減速調整しなければならない。この調整には、専用のクロック発生回路を設け、ハード的に制御する方法と、プログラムによってソフト的に制御する方法とがある。本装置ではこのサンプリング周期の調整には機械語の NOP (no operation) 命令の実行時間を利用するソフト的方法をとった。NOP 命令はその実行に3クロック要し、クロック周波数 8 MHz のパソコンではこの命令1個を実行する度に  $3/8 \mu\text{sec}$  費やされることになる。これを、調整の1ループの中に適切な個数入れることにより、サンプリング周期を調整することができる。この方法はハードウェア作成の負担が無いという利点がある一方で、機種が異なると再調整しなければならないという欠点がある。

NOP 命令の数とサンプリング周期との関係を PC9801E で測定した結果から、測定 of 1 ループに入れる NOP 命令の数を79個と設定した。これらによってきまる本システムの基本的な仕様を表1に示す。

表1 システムの仕様

サンプリング周期	0.0488 msec
サンプリング周波数	20.5 kHz
最高周波数	10.25 kHz
周波数分解能	20.0 Hz
1024点当りの測定時間	50.0 msec
連続測定時間	1.60 sec

## 2) データ格納領域及び連続測定時間

測定後の波形データの格納領域として、32 kB の RAM を使用している。波形データの格納領域は 48 kB まで容易に拡大することが可能であるが、解析時間、ディスクへの記録時間がそれだけ多く必要となるため、これらを考慮して全データ数を 32 kB とした。

従って、1回のトリガで可能な連続測定時間は 1.60 sec となる。

測定した波形データをその都度確認した上で、再測定、再表示、データ保存、波形のハードコピーが可能である。

### 2-2-2 スペクトル解析及び音声再生プログラム

本システムでは、波形データからスペクトルを得る方法として FFT を用いている。区間点数は1024点とした。FFT の計算は、FLASH-16II に付属している機械語ライブラリを BASIC インタープリタから呼び出すことによりおこなっている。この計算は1024点で 4 msec 程度と極めて高速であり、計算によって発生するノイズも少ないという特徴がある。実際の計算では、切り出し区間の不連続接点の影響を軽減するために、サンプリングされたデータに窓関数を乗じたものを波形データとして使用している。窓関数には一般的に使用されている Hamming 窓の他、Hanning 窓、Blackman 窓を選択して使用することができる。以下に各々の窓関数を示す<sup>6)</sup>。本システムにおける FFT 計算では16ビット整数データを使用するので、窓関数も以下の値に16進数  $7FFF_H$  を乗じて使用している。

$$W_{\text{hamming}}(n) = 0.54 - 0.46 \cos(2\pi n/N) \quad (0 \leq n \leq N)$$

$$W_{\text{hanning}}(n) = 0.5 - 0.5 \cos(2\pi n/N) \quad (0 \leq n \leq N)$$

$$W_{\text{Blackman}}(n) = 0.42 - 0.5\text{COS}(2\pi n/N) + 0.08\text{COS}(4\pi n/N) \quad (0 \leq n \leq N)$$

ただし  $N$  は区間点数である。

本プログラムの主な機能を以下に示す。

### 1) 分解能の調整機能

FFT における区間点数を  $N$ 、サンプリング周期を  $T$  とおくと、周波数分解能  $\Delta f$  は

$$\Delta f = 1/NT$$

と表され、時間窓の幅の逆数となる。周波数分解能を変える方法として、

i) FFT 演算の区間点数  $N$  を変える。

ii) サンプリング周期  $T$  を変える。

が考えられるが、FFT 演算の区間点数、サンプリング周期はともに不変とし、有効データ数を変える（残りは0と置く）ことによっても時間窓の有効幅を変えることができる。本システムでは、サンプリング周期、FFT 演算の区間点数は固定しておき、有効データ数を  $2^{10}$ ,  $2^9$ ,  $2^8$ ,  $2^7$  のごとく変えることにより分解能を変化させている。本器の有効データ数と時間窓有効幅、周波数分解能との関係を表2に示す。この方法の欠点は区間どうしの時間的なつながりが薄れることであるが、後述する方法によって改善している。測定対象に応じて分解能を適切に選択することは S/N 比の向上という点からも効果がある。

表2 有効データ点数と周波数分解能

有効データ点数	時間窓の有効幅	周波数分解能
1024	50.0 msec	20 Hz
512	25.0 msec	40 Hz
256	12.5 msec	80 Hz
128	6.25 msec	160 Hz
64	3.125 msec	320 Hz

### 2) オーバーラップ点数の調整機能

FFT では1区間1024点のデータのうちの何点かを前後の区間とオーバーラップさせながら区間を移動し、次々とスペクトルの計算を行う。これは、前述のごとく各区間の時間的な連続性を保つために必要である。本システムにおいて0, 1/2, 3/4, 7/8, 15/16のオーバーラップが選択可能である。オーバーラップを大きくすることにより、時間的な連続性が十分確保される。オーバーラップ15/16では結果がCRT画面いっぱいになるので、専用のプログラムで表示している。

### 3) エネルギスペクトルのカラー三次元表示機能

解析結果は、縦軸に時間の推移を、横軸に周波数を取り、それぞれの時間における各周波数成分の強度を色で階調表示することにより、三次元的に表示される。スペクトルの強度は等差的に8段階に分け、レベルの高い方から黒→青→赤→紫→緑→水色→黄→白の順に表示される。

#### 4) エネルギスペクトルの二次元表示

横軸に周波数、縦軸に各周波数成分の強度をとってスペクトルを二次元表示する。これは、32 kB 分の計算結果のうちの任意の 1 kB 区間のみ FFT 結果を表示するもので、強度は、全区間の FFT 結果の中で最大の強度を100とした相対値で表される。この表示方法は三次元表示されたスペクトルの、周波数軸に平行な切断面を見ることに相当する。

#### 5) スペクトルの比較表示機能

これらの二種類の表示法を選んで画面上の二カ所の表示窓に、独立して表示させることができる。これはスペクトルの特徴の詳細な観察、異なるデータ間の比較などを行う上で効果的である。

#### 6) カラーハードコピー機能

データ処理にパソコンを用いているので、カラープリンタを接続することにより、容易にカラーハードコピーが取れる。特に、コピーキーによる画面カラーハードコピーは N<sub>88</sub> 日本語 BASIC インタープリタ特有の拡張機能であり、インタープリタの環境で動作する本器の長所となる。

#### 7) 音声再生機能

FFT によって得られたスペクトルに何等かの処理を施した後、さらに逆 FFT を行い、この結果をアナログ信号に変換してローパスフィルタを通し、スピーカに出力することができる。

### 3 結果と検討

本システムを利用した解析の一例として、試みに音声波形の解析を行った。図2に女声の母音「ア」のエネルギスペクトルを示す。図の上部はスペクトルの時間的な推移を三次元表示させたものであり、下部はある時間におけるスペクトルを二次元表示させたものである。スペクトルに表れている縦縞あるいはピークは、声帯の基本振動数（ピッチ）の整数倍の成分を表している。本図は分解能をやや落として（有効データ数256）ノイズを減らし、ピッチが明白となる条件で解析したものである。

図3には、男性の母音「ア」の解析結果と低周波発振器による400 Hzの正弦波の解析結果とを比較して示す。典型的な歪波である音声には基本波以外に多くの高調波成分が含まれていることがよくわかる。

図4及び図5は、男性が「アイウエオ」と連続して発音したときのエネルギスペクトルである。図4は有効データ数1024で解析した結果であり、周波数分解能が充分高いのでピッチ周波数（音程）の推移の様子がわかる。図5は周波数分解能を低くし、有効データ数128で解析した結果である。一つの音素から次の音素へ変化する（いわゆる“わたり”）際のフォルマント分布の推移が非常によくわかる。

以上に示したごとく、本システムは簡単な構成でありながら、かなり高い周波数分解能、時間的分解能をもち、容易にカラーハードコピーも取れるので、音声等の歪波形の解析手段として有効に利用できることが明らかとなった。

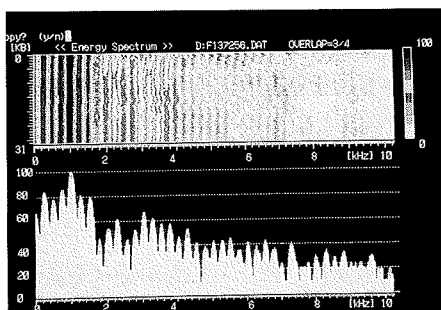


図2 音声波(女声「ア」)のエネルギスペクトル。

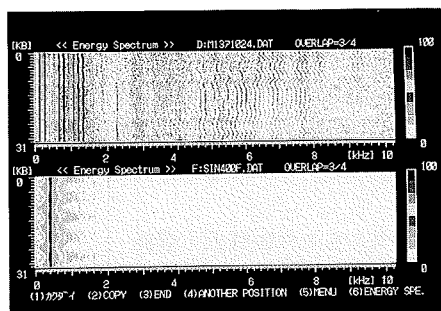


図3 音声波(男声「ア」)と400 Hz 正弦波とのエネルギスペクトルの比較。

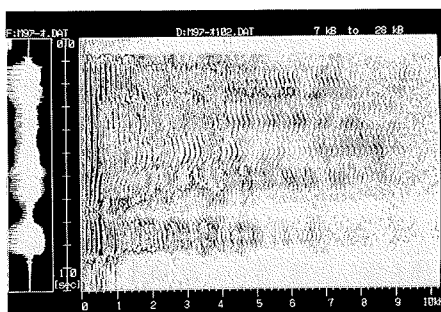


図4 連続音声「アイウエオ」の解析例。周波数分解能 20 Hz。

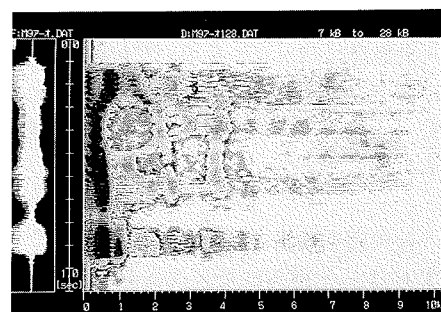


図5 連続音声「アイウエオ」の解析例。周波数分解能 160 Hz。

#### 4 おわりに

本研究においては、パソコンを利用した波形解析システムを試作し、その応用として音声を解析した。このようなシステムは、既に高度なものが開発され、市販されているが、かなり高価である。本研究では、手軽な装置で、それらと同等の機能をできるだけ多く備え、また、それらが持ち合わせていない機能を備えるように心掛けた。特にソフト面でフレキシビリティに富み、目的に応じた機能の変更が容易である。

試作したシステムで試みに母音音声を測定した結果は、今までの音声学の分野で研究され、立証されてきたことに見合うものであり、音声解析の簡易システムとして、満足のいく結果が得られることが明らかとなった。プログラムの改良によって、障害児のための発音訓練、声楽・器楽などの楽音解析等に应用することができ、発声法や演奏法等の教育にも効果をあげることが期待される。また、変調波や一般の歪波、あるいは機械的振動等、音声以外の波形を解析し、比較表示機能などを生かして教育に利用することも可能である。

#### 引用文献

- 1) 五十嵐寿一：実験物理学講座 9 音響と振動（共立出版，1968）第6章。
- 2) 藤崎博也他：岩波講座 日本語 5 音韻（岩波書店，1977）第3章。

- 3) 西田五佐夫, 西田英樹, 尾西 寛, 岡本潔政: 鳥取大学教育学部研究報告, 35 (1986) p. 55.
- 4) 南 茂夫: 科学計測のための波形データ処理 (CQ 出版, 1968) 第 8 章.
- 5) 古井貞熙: デジタル音声処理 (東海大学出版会, 1985) 第 4 章.
- 6) 三上直樹: デジタル信号処理入門 (CQ 出版社, 1989) p. 100.

### Abstract

FFT analyses of Waveform were attempted using a personal computer and an AD converter. A sampling interval of the converter is about 0.05 msec. Point number of FFT is 1024 and the calculations are executed using a vector signal processor board available. Resolution of the system is adjustable by varying effective number of points in a window. Results are displayed to CRT by colors and hardcopies can be obtained. This system can be applied in an area of audio frequency to analyses and education.

