

FFTを用いた会話型時系列解析システム：「LABOCS / TSA」

鉄道技術研究所 電子計算センター
吉村彰芳，森 忠夫，吉田康夫

1. まえがき

鉄道技術研究所においては、鉄道に関する種種の工学的問題についていろいろな角度から研究が行われている。これらの研究におけるアプローチの中で、特に研究対象に関連したさまざまな現場試験または模型実験によって観測されたデータをコンピュータを用いて統計的に解析することは、非常に重要な位置を占めている。

通常このような試験データは、一たん計測用アナログデータレコーダに記録され、しかる後A/D変換器によりデジタルデータ(時系列データ)に変換されてコンピュータ処理が行われる。

ここで述べるLABOCS/TSAシステムは、そのような試験データを会話的に処理できるよう開発されたものであるが、従来の類似のシステムに比し、試験データ処理のもつ研究的な面を特に考慮に入れ、より研究者向きのシステムとして作成されている。すなわちこのシステムを利用する研究者は、グラフィックディスプレイを介してコンピュータと対話しながら、専門家としての考察、判断をまじえて処理を進めることができ、従来のプログラミングやデータ整理の仕事から解放される。

2. LABOCS/TSAの基本構成と特徴

会話型時系列解析システムLABOCS/TSA (LABORatories Conversational System for Time Series Analysis) は、鉄研、電子計算センターにおけるLABOCSシステムの開発における最初の成果であり、今後予定されている一連のLABOCSシステムと密接に関連している。LABOCSは、鉄研における種種の工学的研究の中、主として動的システム(dynamical system)の研究に役立つような会話型コンピュータシステムの総称として名付けたものである。鉄道における、例えば車両、架線、軌道、構造物などのダイナミックス、およびそれらに関連した騒音、振動問題などの研究への適用を主眼においている。

さてこのような背景のもとに、いわゆる試験データ処理のために開発されたのがLABOCS/TSAである。本システムはFACOM 230-35 中型コンピュータと、これに結合されたリフレッシュ型の高級グラフィックディスプレイ(F6233A)、A/D変換器(DATAC)、コンピュータとはオフラインであるがグラフィックのハードコピー用としての静電プロッタなどを用いて動作する。図1はシステム全体を図式的に表わしたものである。

図1のグラフィックCRT画面内に示したように、試験データ処理のためにシステムは、次の4つのステージから構成された。^[1]

- (1) A/D変換(A/D Conversion)
- (2) データの表示(Data Visual Display)
- (3) データの前処理(Data Preprocessing)
- (4) データの解析(Data Analysis)

まず第一に、ステージ(1)において、アナログ測定データがデジタル時系列デ

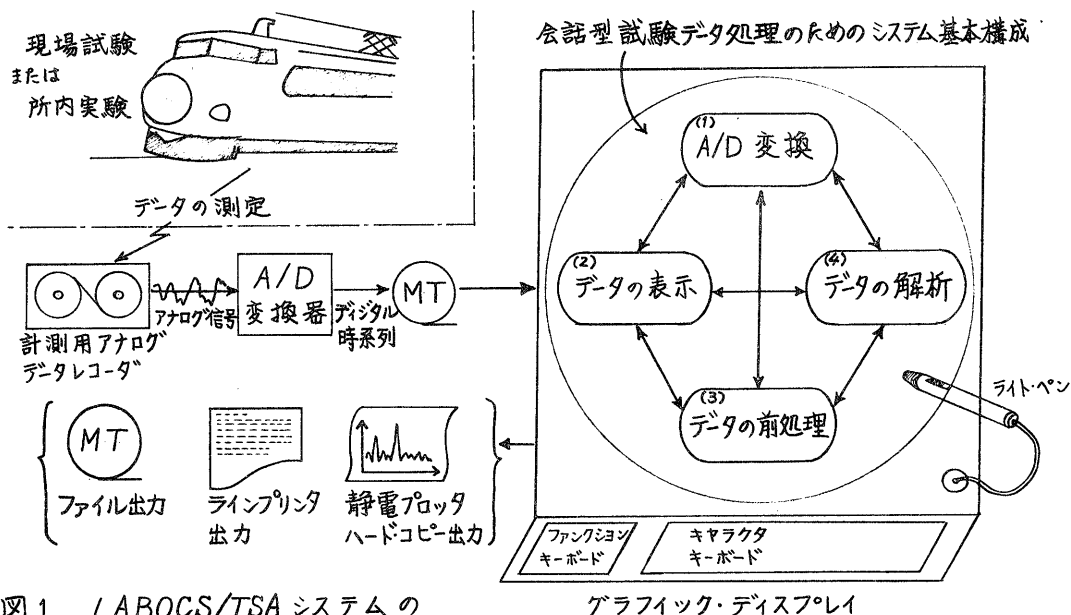


図1 LABOCS/TSAシステムの
全体説明図

ータに変換される。ところで多くの場合、測定されたデータはそのままでは直ちに解析されることができない。例えば測定信号に種類の雑音が混入しているなどはよくあることで、このような場合、これらを除去せずにデータ解析を行っても正確な結果が得られない(スペクトル推定の場合のように)。このようにデータ解析に先立って、いろいろな不都合な条件があればそれらを除去しておくことが大切である。このような観点からステージ(2)および(3)が設定された。

ステージ(2)においては、グラフィック画面上で処理の対象となる時系列データを連続波形として研究者が注意深く観察することができるようになっている。この段階で、信号に予期せぬ雑音が含まれていることなどが知られる。そしてこのようなデータの観察から、どのような前処理が必要とされるかを判断したならば、ステージ(3)に進む。

ステージ(3)においては、上述の例の場合には、デジタル・フィルタリングの方法により雑音成分の除去が行われることができる。

最後のステージ(4)においては、目的のデータ解析が行われる。

図2に、現在までに作成され利用可能となっているLABOCS/TSAシステムのデータ処理機能を示す。この図からも明かなように、通常の時系列解析機能の大部分が含まれている。特に図の記号*で示されたように、高速フーリエ変換アルゴリズム(FFT)⁸²⁾が、各種の統計的パラメータの計算やデジタル・フィルタリングに応用されている。FFTはわれわれの会話型システムの開発にとって欠くことのできないものであった。すなわち会話型処理においては、レスポンス・タイムの早いことが重要な要件となるからである。

LABOCS/TSAシステムの特徴としては、上記のようなシステム基本構成のもとに、会話型処理の標準パターンを設定し、これを有効とするために、時系列解析データのファイル管理をシステム内で統一的行うようにし、また種類の便利な出力機能を準備したことなどがあげられる。

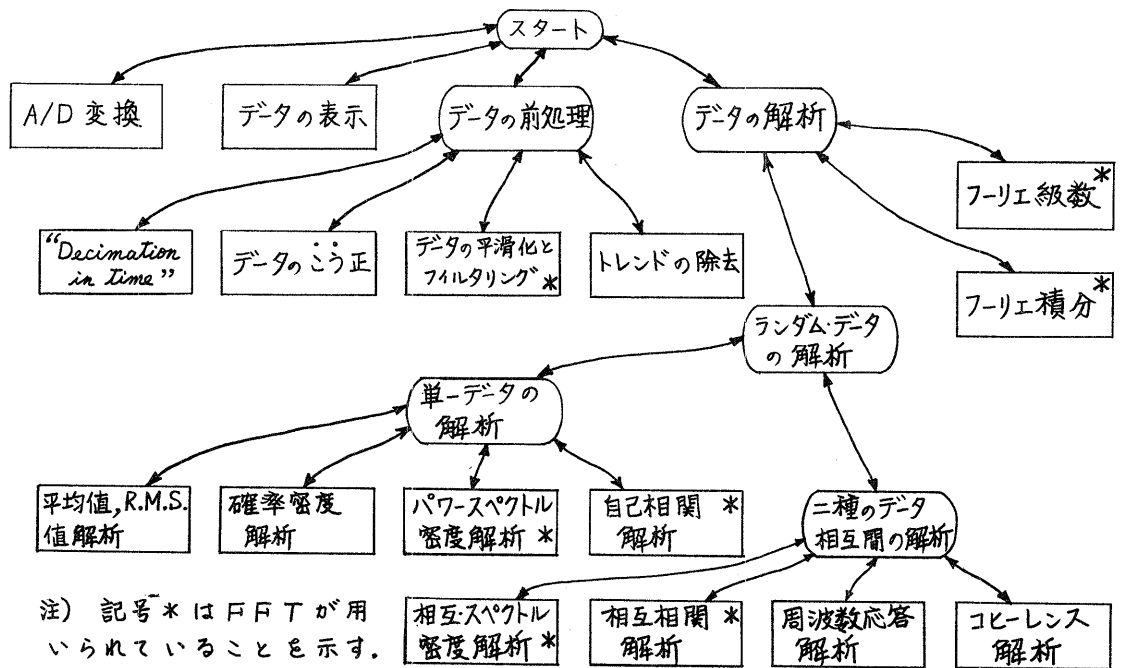


図2 LABOCS/TSA におけるデータ処理機能

3. 会話型処理の標準パターンと出力機能

本システムにおいては、図2のどの処理ブロックにおいても図3で示したような会話型処理が可能である。研究者はまずライトペンを用いて磁気テープ・ファイルから処理の対象となる入力データを指定し、ついでその処理に特有の処理パラメータをライトペンやタイプライター・キーより入力し処理を行なう。その処理結果はグラフィック・ディスプレイ画面にグラフ表示されるので、これとみて場合により処理パラメータや入力データの変更と指示することができる。これを何度かくり返した後、所望の結果が得られたらライトペンを用いて静電プロッタへのハードコピー、ラインプリンタ、磁気テープへの出力を随時行なうことができる。

この間、入力データの指定においては、処理区間を任意に指定することができる。

3種類の出力機能により、処理結果の作表・作図、データの整理と保存といったようなデータ処理に伴う手間が大幅に軽減されている。

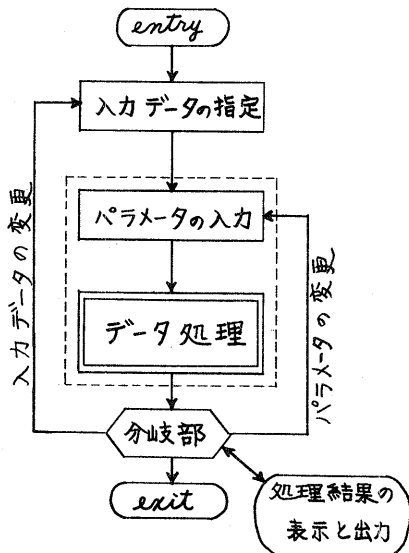


図3 会話型処理の標準パターン

4. 会話型時系列解析のためのデータ・ファイル管理

時系列解析においては、各種の性質の異なるデータが発生し、しかもあるデータが別の処理の入力として用いられるなど、会話型システムにおいてはこれらを統一的に管理することが必要とされる。

まず第一に本システムでは、システム内でデータの種別を容易に識別するため、それぞれの種別に応じて表1のような代表番号を採用した。

代表番号	データの種別
10	デジタル時系列データ
20	平均値およびR.M.S.値
30	確率密度関数
40	フーリエ級数およびフーリエ積分
50	自己相関関数
60	相互相関関数
70	パワースペクトル密度関数
80	相互スペクトル密度関数
90	周波数応答関数
100	コヒーレンス関数

表1 データの種類と代表番号

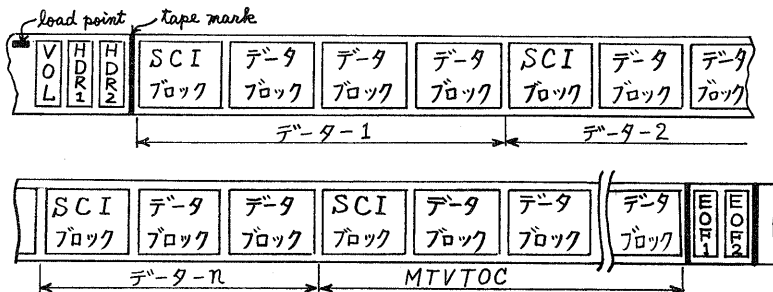


図4 磁気テープ上のデータ・ファイルの構成

次にこれら各種データのファイル管理のため、入出力ファイルとして用いられる磁気テープの構成を図4のように設計した。すなわち各データ・ファイルの先頭にSCIと呼ばれる制御ブロックを設け、そのデータ・ファイルに関するあらゆる情報(例えば、データの種別、作成年月日、表題、入力データ、各種処理パラメータなど)をここに格納した。また磁気テープ全体の管理を行なうため、MTVTOCと呼ばれる制御ブロックを最後尾に(データの追加を可能とするため)設定した。

図5にパワースペクトル密度データのSCIブロックの例を示す。

このような時系列解析データのファイル管理機能により、より柔軟な会話型処理が可能になるとともに、利用者が誤った操作をしても、システムが自動的にチェックすることができ、また将来異った種類のデータの追加も容易で、システムの拡張性にも富んでいると言える。

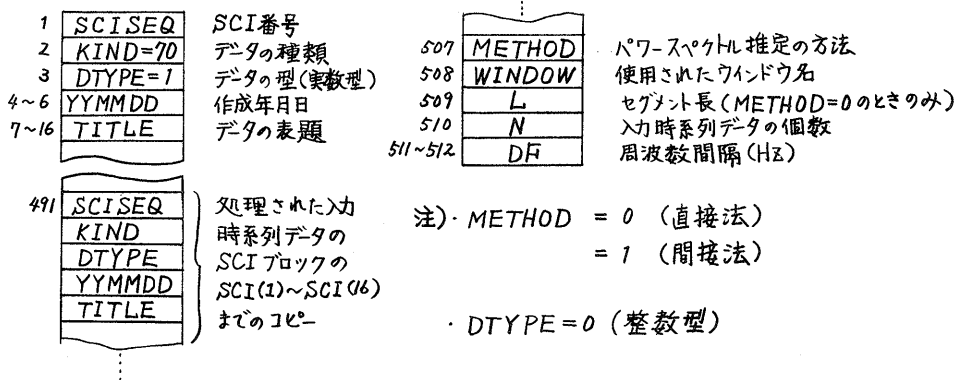


図5 パワースペクトル密度データのSCIブロックの構成例

5. LABOCS/TSAにおけるデータ処理機能

5.1 A/D変換

本システムでは、コンピュータに結合されたA/D変換器を用いて、最大16チャンネルまでマルチプレクサ切換えにより1チャンネルにつき最高30KHzで高速サンプリングを行うことが可能である。

これらのA/D変換のための条件設定もまたグラフィックを介して入力される。それらは例えば、アナログ入力チャンネル数、サンプリング間隔 Δt 、A/D変換のスタート/ストップ条件、変換されたデジタル時系列データの出力磁気テープ装置の番号などである。これらに加えて、入力データそれぞれに最大20文字までの任意の名前(表題)を付けることができる。

なお当センターには、時刻信号発生装置も用意されていて、A/D変換データとともに時刻コードもデジタルテープに記録可能なので、後の種種のデータ解析に際して、制御情報として便利に利用されることが出来る。

5.2 データの表示

時系列データおよび種種の計算結果は、もし望むならいつでもグラフィック画面上に表示される。

表示されたデータに対しては、両軸のスケールリングの変更、デシベル変換、カーソルとファンクションキーによるグラフ上の値の読み取り、表題の入力、比較のための2個の処理結果の重ね合わせ表示などが可能で、高級グラフィックディスプレイの機能を最大限に生かして会話型処理の実をあげている。

5.3 データの前処理

データの前処理機能としては、図2に示されたような4つの機能が現在利用可能である。

“Decimation in time”機能は、図6に示されたように、入力時系列 x_n からM個ごとに1個のデータをとって y_n と出力するので、例えばデジタルフィルタリングにより高周波雑音を除去後、このような処理を行ってデータの総数を減らし、後続のデータ解析の計算時間の節約を行うためなどに有効な機能である。

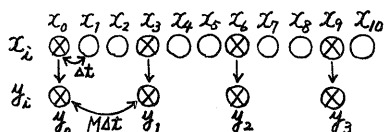
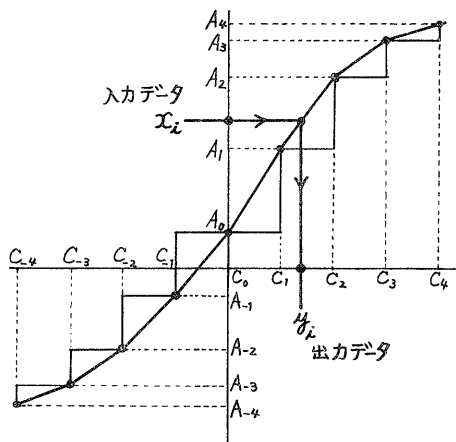


図6 “Decimation in time”処理

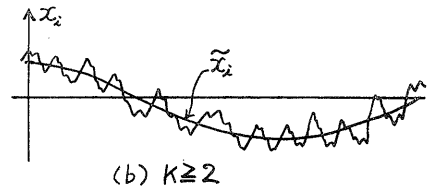
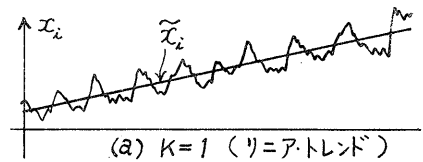
データのこう正機能には二つのものがある。一つは、単にデジタル時系列データを物理的単位をもったデータに変換するためのものである。もう一つは、データの非線形変換を行うもので、これは、データ測定時に使用されたトランスジューサが非線形な特性をもつ場合に、これを補正するときに有効な機能である。この機能を用いるには、あらかじめデータ測定時に、既知の入力レベル(複数個)に対するトランスジューサの出力をデータレコーダに記録しておかねばならない。このような準備のもとで、図7に示したような方法でデータの修正が行われる。

トレンド除去の機能は、high-passデジタルフィルタリングによってもなかなか除去不可能な超低周波成分の除去のために用意されたもので、図8に示したように、最小二乗法を用いた多項式近似により除去される。現システムでは0次(直流分)から4次までのトレンドの除去が可能である。^{[1],[2]}



パラメータ: $(C_i, A_i), |i| \leq 8$
 C_i : 既知の入力レベル
 A_i : C_i の A/D 変換値

図7 データのこう正



パラメータ: $K, 0 \leq K \leq 4$
 最小二乗法による K 次多項式近似.

$$\tilde{x}_i = \sum_{k=0}^K a_k (i \Delta t)^k, \quad y_k = x_i - \tilde{x}_i$$

図8 トレンドの除去

データの平滑化と周波の機能は、デジタルフィルタリングの方法を用いて、信号に含まれる雑音成分の除去、種類の周波数成分の分離などを行うためのものである。

本システムでは

$$y_n = \sum_{n=0}^{N-1} h_n x_{n-n} \quad \text{----- (1)}$$

の形で与えられる，“non-recursive filter”を用いている。ここで x_n, y_n は、それぞれフィルタの入力および出力時系列データ、 h_n は、デジタルフィルタの重み係数である。(1)式の両辺を z 変換して、フィルタの周波数応答

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \sum_{n=0}^{N-1} h_n \cdot z^{-n} \quad \text{----- (2)}$$

を得る。ここで $z = e^{j2\pi f \Delta t}$ である。

デジタルフィルタの設計における問題は、任意の所望の周波数応答を与えられたとき、それを満たす h_n をどのように決めるかということである。本システムで採用したフィルタの設計法は、L.R. Rabiner らの研究による「周波数サンプリング法 (Frequency Sampling Method)^[3]」と呼ばれる方法で、FFT を用いており、グラフィック・ディスプレイを用いた会話形式での設計に通じている。図9に、low-pass フィルタの設計におけるディスプレイ画面と設計パラメータとの関係を示す。フィルタの特性を改善するには、サンプル数 N を大きくするか、またはフィルタの過渡領域 (Transition region) を広げるかすればよい。設計条件が入力されると直ちにFFTを用いて実際の周波数特性を計算し、グラフィック画面に表示する。このように本システムでは、デジタルフィルタの Computer aided design が実現されている。

所望のフィルタが得られたなら、次にこのフィルタへの入力時系列データを指定して実際のフィルタリング演算が行われる。ここでもFFTが応用される。すなわち Stockham により提案された “Overlap-Adding Method” と呼ばれる方法

SMOOTHING AND FILTERING

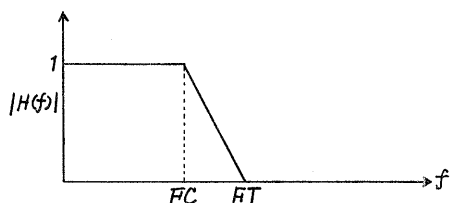
** LOW-PASS FILTER **

FC =

FT =

N =

DT =



パラメータ: FC, FT, N, DT

$16 \leq N = 2^n \leq 512$, $DT (= \Delta t)$
 $F = 1/\Delta t$, $\Delta f = F/N$ でサンプリング.
 $FC \leq f \leq FT$: transition region.

図9 Low-pass フィルタの設計におけるパラメータ入力のディスプレイ画面

5.4 データの解析

データの解析部には、通常必要とされる時系列解析機能の大部分が含まれる^[1]すなわち通例にならって、処理の対象となるデータを、確定的な(deterministic)ものと、不規則な(random)ものとに分類し、前者に対しては、周期的(periodic)データに対するフーリエ級数展開、一時的(transient)データに対するフーリエ積分、後者に対しては、いわゆるスペクトル解析および関連のデータ解析手法(周波数応答、コヒーレンスなど)をほとんどシステムに組み込んでいる。

これらの解析においても、図2に示したように、いたるところでFFTが応用されている。例えば、パワースペクトルの推定においては、図10に示したように

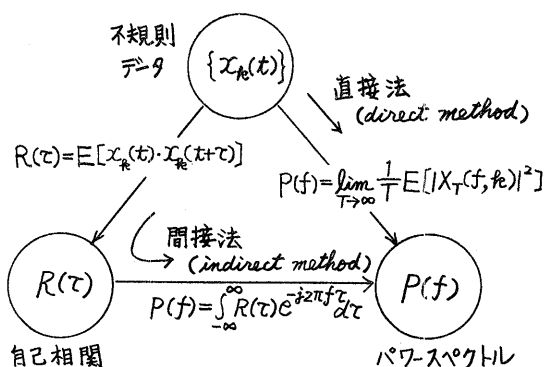


図10 パワースペクトル推定における直接法と間接法

を採用している^{[4],[5]}これは(1)式の演算のように、長さの異なる二つの数列のコンボリューションの計算に対して、セクション化(Sectioning)を行う方法である。

なお前述の low-pass フィルタの設計においては、位相特性 $\theta(f)$ は

$$\theta(f) = -2\pi f \tau \Delta t \dots\dots\dots (3)$$

$$\tau = (N-1)/2, \quad 0 \leq f \leq F/2$$

で与えられる線形位相をもつので、高周波雑音を含む信号の平滑化にも応用される。(ただし入力に対して出力信号は、 $\tau \Delta t$ なる遅れをもつことに注意しなければならない。)

デジタルフィルタの設計法には、他にもいくつかの方法があるので、今後さらに検討していきたいと考えている。

一般に二つの推定法があるが^[11]LA B O C S / T S A システムでは、どちらでも利用されることができ。そしていずれの場合にもFFTが用いられている。

直接推定法においては、図11に示したように、P. D. Welch によるFFTを用いた計算法が採用されている^[6]この方法では、所望のスペクトル推定における周波数分解能に応じて、入力時系列データをセグメント化できるので、内部メモリの限られたコンピュータにおける計算に適していると考えられる。

また直接推定においては、スペクトル

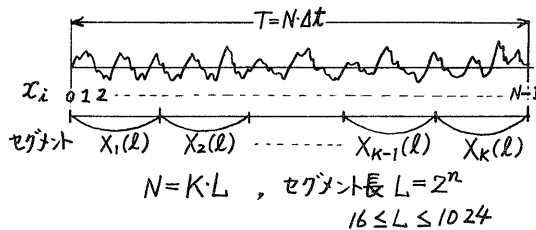


図11 P.D. Welchによるパワースペクトルの直接推定法におけるセグメント化

(1) Boxcar $w_3(t) = 1$	(4) Hanning $w_3(t) = \frac{1}{2} \left(1 + \cos \frac{\pi t}{T/2} \right)$
(2) $1 - t^2$ タイプ $w_3(t) = 1 - \frac{t^2}{(T/2)^2}$	(5) Hamming $w_3(t) = 0.54 + 0.46 \cos \frac{\pi t}{T/2}$
(3) $1 - t $ タイプ $w_3(t) = 1 - \left \frac{t}{T/2} \right $	(6) Papoulis $w_3(t) = \cos \frac{\pi t}{T}$

$$|t| \leq T/2$$

表2 パワースペクトルの直接推定法におけるデータ・ウィンドウ

平均値と標準偏差も同時に求められ、望むならグラフィック画面上で、推定された確率密度関数とともに、それと平均値、標準偏差の等しい正規確率密度関数もあてはめてみることも可能である。

周波数応答解析においては、次の3種類の定義のいずれでも自由に選択することができる。

$$\begin{aligned}
 \text{タイプ 1)} \quad & H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)} \\
 \text{タイプ 2)} \quad & H(f) = \frac{G_{xy}(f)}{G_x(f)} \\
 \text{タイプ 3)} \quad & |H(f)| = \sqrt{\frac{G_y(f)}{G_x(f)}}
 \end{aligned}
 \left\{ \begin{array}{l} X(f), Y(f) \text{ はそれぞれ入出力のフーリエ変換。} \\ G_x(f), G_y(f), G_{xy}(f) \text{ は、それぞれ入出力のパワースペクトルおよび相互スペクトル。} \end{array} \right.$$

この場合、入力データは2個指定されるようになっている。

コヒーレンス解析においては、コヒーレンス関数 $\gamma_{xy}^2(f)$ が

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_x(f) \cdot G_y(f)}$$

によって計算される。この場合は3個の入力データ (G_x, G_y, G_{xy}) が指定される。コヒーレンス関数 $\gamma_{xy}^2(f)$ は、線形時間不変システムに対しては、 $\gamma_{xy}^2(f) = 1$ となるが、システムが線形でなかったり、入出力の測定に外部雑音が存在したり、出力 $y(t)$ が $x(t)$ 以外の他のシステム入力にも依存しているようなときには、1より小さくなるという性質をもつから物理系の解析には非常に有用なものである。

6. その他の追加機能

以上述べてきた機能以外に、さらに次の二つの機能が追加された。

ラルウインドウの側帯波 (side lobes) による、いわゆる漏れ (leakage) の影響を小さくするため、いろいろなデータ・ウィンドウが用いられるが、本システムでは、表2に示したようなものが用意されている。

パワースペクトルの間接推定法においては、それまでに求められている自己相関関数データが入力として指定される。

自己相関関数を入力時系列から計算する場合には、C.M. Raderの方法に従ってFFTが用いられている。^[12]

以上FFTの応用を強調してきたが、その他の処理についても簡単に説明しておこう。

確率密度解析においては、処理パラメータとして、データの上下限值と、その間の分割数を任意に指定できるようになっている。またその計算の際、

一つは、ファイルの再編集機能で、試験データおよび処理結果の増大に応じて、ファイルとして保存するデータの再編集を行う必要が生じたときに有効に利用される。

もう一つは、時系列データに対する基本演算機能で、システムにまだくみ込まれていない特殊な処理が必要となったときに利用される。表3にそれらを示す。

1	$A * X + B$
2	$A * \text{SQRT}(B * X) + C$
3	$A * \text{ABS}(X) + B$
4	$A * \text{LOG}_{10}(B * X) + C$
5	$A * \text{LOG}(B * X) + C$
6	$A * DX/DT$ (微分)
7	$A * \text{SIGMA}(X * DT)$ (積分)
8	$A * \text{SIN}(B * X) + C$
9	$A * \text{COS}(B * X) + C$
10	$A * \text{TAN}(B * X) + C$

(a) 1入力の場合

1	$A * X + B * Y + C$
2	$(A * X) * (B * Y) + C$
3	$(A * X) / (B * Y) + C$

(b) 2入力の場合

表3 時系列データに対する基本演算

$X \cdots x = (x_0, x_1, \dots, x_{N-1})$ A, B, C は
 $Y \cdots y = (y_0, y_1, \dots, y_{N-1})$ 任意の定数

$x \pm y$ とは $(x_0 \pm y_0, x_1 \pm y_1, \dots, x_{N-1} \pm y_{N-1})$ なる
 新しい時系列データを発生することと意味する。

7. あとがき

LABOCS/TSAでは、人間と機械とがそれぞれ得意なところを分担し、機械(コンピュータ)の方は計算から結果の作表作図を全面的に受け持ち、一方人間の方は、専門家としての考察、判断をまじえながら処理の流れを制御できる、というふうにマン・マシン会話型システムのあるべき姿がかなり良く実現されたと考えている。

本システムは、すでに鉄研内の多くの試験データ処理に利用されている。

LABOCS/TSAシステムは、今後まだまだ多くのデータ処理機能の拡張を予定しているが、これと並行して冒頭にも述べたように、動的システムの会話型シミュレーションや、システムモデルの推定および同定、システムの予測と制御などのための会話型システムの開発なども行っていく予定である。

おわりに、本システムの開発にあたっては、電子計算センター山本前室長、森室長、沼田主任研究員、および同センター室員の多くの方から終始熱心なご指導とご鞭撻をいただいたことを付記し、ここに深く謝意を表します。

〔参考文献〕

- [1] J.S. Bendat, A.G. Piersol, "Random data: analysis and measurement procedures", John Wiley & Sons, 1971
- [2] R.K. Otnes, L. Enochson, "Digital time series analysis", John Wiley & Sons, 1972
- [3] L.R. Rabiner, R.W. Schaffer, "Recursive and nonrecursive realizations of digital filters designed by frequency sampling techniques", IEEE Trans., 1971, AU-19, pp. 200/207
- [4] T.G. Stockham, "High-speed convolution and correlation", SJCC, 1966, pp. 229/233
- [5] H.D. Helms, "Fast Fourier transform method of computing difference equations and simulating filters", IEEE Trans., 1967, AU-15, pp. 85/90
- [6] P.D. Welch, "The use of fast Fourier transform for the estimation of power

- spectra", IEEE Trans., 1967, AU-15, pp. 70/73
- [7] A. Papoulis, "Minimum-bias windows for high-resolution spectral estimates", IEEE Trans., 1973, IT-19, pp. 9/12
 - [8] J.W. Cooley, J.W. Tukey, "An algorithm for the machine calculation of Fourier series", Mathematics of Computation, 1965, pp. 297/301
 - [9] J.W. Cooley, P.A.W. Lewis, P.D. Welch, "Application of the fast Fourier transform to computation of Fourier integrals, Fourier series, and convolution integrals", IEEE Trans., 1967, AU-15, pp. 79/84
 - [10] 吉村, 森, 吉田, "会話型時系列解析システム「LABOCS/TSA」の開発", 鉄道技術研究報告, 1975, No. 980
 - [11] R.B. Blackman, J.W. Tukey, "The measurement of power spectra", Dover, 1958
 - [12] C.M. Rader, "An improved algorithm for high speed auto-correlation with applications to spectral estimation", IEEE Trans., 1970, AU-18, pp. 439/441