

ME'scopeVES によるモーダル解析実験

Modal Analysis Experiment by ME'scopeVES

新田 陽一**

Yoichi NITTA

概要

平成 18 年度高専教育充実設備費で電気情報工学科に導入(更新)されたモーダル解析装置について、改訂した学生実験指導書を通じて紹介する。解析ソフトウェアは、現在、国内で圧倒的なシェアを持つといわれる Vibrant Technology Inc. の ME'scopeVES であり、データ収集のフロントエンドは(株)小野測器 DS-2000 データステーションとなっている。平成 6 年度に導入した Spectral Dynamics Inc. の STAR System と(株)RION の SA-74 FFT アナライザによるシステムより、モデリング機能や解析精度が向上しているため、学生実験のみならず、技術相談などの実践的な目的にも利用できる。

1. まえがき

構造物の振動特性を調べることは防振・防音のための基礎データを得る上で必要不可欠と言える。また、構造物はその形状、材質、支持条件が定まると、特定の周波数において固有の状態で振動する性質(共振)を有しており、これを固有モードと呼んでいる。モーダル解析はこの固有モードを調べる手法であり、実験的に求める場合は実験モード解析と呼ばれることもある。本稿では、実験モード解析のことをモーダル解析と称することにする。

電気回路における共振現象は周波数選択器などに応用されており、重要な役割を果たしている。その特性は機械要素の共振と類似しており、理論的な解析も同様に考えることができる。また、制御工学における伝達関数、特に 2 次遅れ系の特性を理解する上で、機械的な振動現象は一つの好例である。このような観点から、電気情報工学科(電気工学科)では、5 年生の学生実験にモーダル解析を含めた振動計測のテーマを設定している。また、専攻科生産システム工学専攻の特別実験でも、これを発展させた内容で実験・実習を行っている。物体が動く際には必ず振動や騒音の問題が発生するので、機械系・電気系いずれの学生でも、モーダル解析に触れておくのは有意義であると考えている。

旧電気工学科にモーダル解析装置(Spectral Dynamics Inc. STAR System)が導入されたのは平成 6 年度で、音

響振動計測システムの代表的な機能の一部であった。これ以降、上記の学生実験や卒業研究などで教育に活用してきたが、10 年以上が経過し、使用する PC (NEC PC-9801 シリーズ) が絶版になるなど、故障時に修理不可能な状態となってきた。そこで平成 18 年度高専教育充実設備費による更新を申請し、本設備が導入の運びとなった。ここでは、改訂した 2 種類の学生実験指導書の内容とともに、新設備の基本機能を紹介する。

2. システム構成

2.1 ME'scopeVES

モーダル解析の基本的な手順は

- (1) 解析対象のモデリング
- (2) 伝達関数の収集
- (3) モーダルパラメータの抽出・検証
- (4) モードアニメーションの観察

であるが、これに先だって予備的な検討を行うことがある。例えば、有限要素法による挙動解析を行い、伝達関数を測定する際の最適加振点や測定ポイントを決定することなどである。また、モーダル解析の結果と有限要素法の結果の相関性から解析結果の妥当性を検証し、外力応答や構造変更などの発展的な解析を行うこともある。

モーダル解析ソフトウェア ME'scopeVES は米国 Vibrant Technology 社^[1]によって開発され、日本では(株)システムプラス^[2]が販売代理店となっている。表 1 に示すように、ME'scopeVES は 3D モデリング、測定データ表示、アニメーション表示(デジタルムービー出力を含む)、レポート作成を標準機能とし、これに各種の発

* 原稿受理 平成 19 年 10 月 1 日

** 電気情報工学科

表1 ME'scopeVESシリーズの商品構成と機能一覧

機 能	Visual ODS	Visual ODS Pro	Visual Modal	Visual Modal Pro	Visual SDM
3D モデリング機能	○	○	○	○	○
ODS, EDS の時間/周波数のアニメーション	○	○	○	○	○
ODS, EDS のシェーブ・データのアニメーション	○	○	○	○	○
各種アナライザー/レコーダ・データのインポート	○	○	○	○	○
微分/積分機能		○	○	○	○
FFT, 逆FFT, ノッチ/バンド・フィルタ		○	○	○	○
波形編集機能		○	○	○	○
リニア・パワースペクトル, PSDs 計算		○	○	○	○
ODS FRF 実稼働解析 ODS トラッキング・アニメーション		○	○	○	○
MIMO 解析, 外力応答シミュレーション				○	○
モーダル解析, FRF シンセシス			○	○	○
構造変更シミュレーション (有限要素, サブストラクチャリング, 感度解析)					○
デジタル・ムービー (AVI ファイル作成)	○	○	○	○	○

展的機能を付加する商品構成になっている。ベースパッケージ Visual ODS (Operating Deflection Shapes) では、標準機能として時間/周波数ベース実稼働アニメーション表示機能が備わっている。これは同期測定したデータをもとに、対象物の振動の時間的な変化、もしくは特定周波数における振動の様子を表示するものである。Visual ODS Pro では波形処理機能が付加され、入力信号を必要とせず、応答信号のみからの実稼働解析が可能となる。

Visual Modal では、モーダル解析機能が加えられる。実稼働解析はどのように対象物が振動しているかを調べるものであるが、モーダル解析はその振動が対象物の固有(共振)特性に依存するものであるかどうかを調べる。今回導入したモデル Visual Modal Pro では、多点参照入力データによる近接・重根モードの分離や外力応答シミュレーションの機能を備え、より高度な解析が可能である。最上位モデルの Visual SDM は構造変更シミュレー

ション機能を有し、計測データをもとに材質変更や補強後の応答の変化を計算することができる。

一方、周波数応答関数 (FRF: Frequency Response Function) の収集を容易に行えるようにするため、フロントエンド用のデータ収集ウィンドウやメニューの日本語表示オプションを追加し、学生でも操作しやすい環境を整えた。

2.2 データ収集装置 DS-2000

データ収集のためのフロントエンド装置には(株)小野測器^[3] DS-2000 データステーションを選定した。導入したモデルは4ch 入力, 24bit, 40kHz の基本性能をもち、単独でも使用できるように、FFT 解析, トラッキング解析, スループットディスク機能 (HDD データ記録) の各ソフトウェアを揃えた。PC とのインターフェースは専用の PCI カードによる。

3. 実験指導書I - モーダル解析の概要 (学生配布用) -

モーダル解析は周波数領域の振動解析法のひとつで、構造物の共振周波数における固有振動モードをアニメーションで表示することができる。したがって、普段目に見えない振動現象を映像でとらえられるため、直感的に理解しやすいばかりでなく、構造物がもつ共振特性を明らかにし、設計変更のための重要な情報を得ることができる。現在では自動車、飛行機などの機械製品を始め、スピーカ、ハードディスクなどの電気製品に至るまで、種々の分野に応用されている。

モーダル解析は、以前は専用の解析器があったが、現在ではデータ収集装置とコンピュータアプリケーションの組み合わせでシステムを構成する。本実験では解析ソフトウェアとして Vibrant Technology 社の ME'scopeVES を使用する。以下に自由平板の解析例をあげて、モーダル解析の手順を紹介する。

3.1 構造物のモデリング

まず、コンピュータで構造物のモデリングを行う。ここでは図 1 に示すようにワイヤーフレームモデルを作成する。このメッシュの節点の xyz 座標と、節点間の結線データを設定すればよいが、ME'scopeVES では CAD に

よる作図と同様な作業で済み、複雑なモデルの作成も容易になっている。

3.2 伝達関数の測定

モーダル解析では、節点間の伝達関数 (FRF) を計測し、それから共振周波数、減衰係数、固有モード形状を計算する。構造物の特性に方向性がなければ、ある 2 点間の伝達関数はいずれの点を入力/出力としても同じになる。したがって、計測方法は応答点を固定して加振点を順次移動する方法と、加振点を固定して応答点を順次移動する方法がある。本実験ではインパルスハンマによる加振を行うので、応答点となる加速度ピックアップを固定する方法 (加振点移動) が都合がよい。

インパルス関数をラプラス変換するとステップ関数となることからわかるように、インパルス加振はあらゆる周波数で構造物を加振することと等価である。列車やバスの車輪ボルトの緩みや、トンネル内壁のコンクリート剥離の点検などにおいて、ハンマによる打撃試験が行われるのも、この原理にもとづいているといえる。実際に加振周波数帯域の上限はハンマの先端チップの材質によって異なるが、硬いチップほどインパルスの時間幅が短くなり、高い周波数まで加振することができる。本実験で使用するプラスチックチップでの上限周波数は、およそ 3kHz である。

図 2 に伝達関数の例を示す。伝達関数は複素関数であるので、本図のように実部・虚部、もしくは大きさ・位相 (ボード線図) やベクトル軌跡 (ナイキスト線図) など、

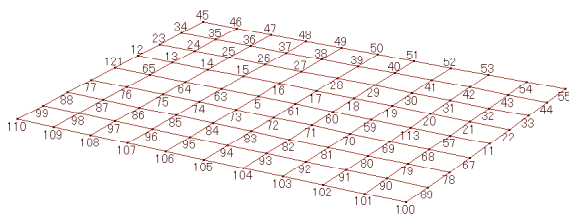


図1 平板のモデリング

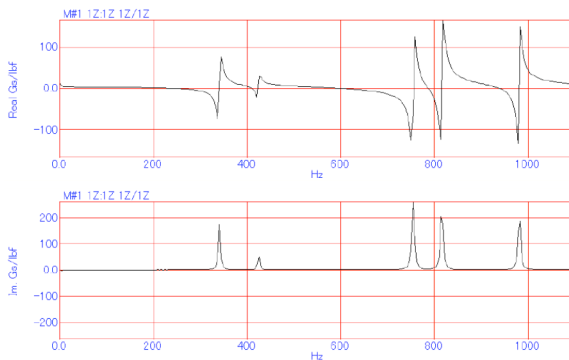


図2 伝達関数

一般には 2 次元グラフで表示される。図 2 において、実部で極性反転、虚部でピークが生じている点が共振を表しているが、ひとつの共振状態を取り出したとすると、それは 2 次遅れ系の伝達関数

$$G(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.1)$$

と同じ特性になっている。すなわち、構造物の伝達関数は 2 次遅れ系の伝達関数を複数合成したものと考えることができる。

3.3 モーダルパラメータの推定

得られた伝達関数よりモーダルパラメータ、すなわち固有共振周波数、減衰係数、固有振動モード形状を推定する。これは上記の 2 次遅れ系の伝達関数を次のように因数分解し、各定数を求めることに他ならない。

$$G(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{R}{s-p_n} + \frac{R^*}{s-p_n^*} \quad (3.2)$$

(*印は複素共役を表す)

上式の分母を因数分解して、伝達関数の極 p_n を求めると、

$$\begin{aligned} s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 &= (s + \zeta\omega_n)^2 - \zeta^2\omega_n^2 + \omega_n^2 \\ &= (s + \zeta\omega_n)^2 + (1 - \zeta^2)\omega_n^2 \\ &= \{(s + \zeta\omega_n) + j\sqrt{1 - \zeta^2}\omega_n\} \{(s + \zeta\omega_n) - j\sqrt{1 - \zeta^2}\omega_n\} \\ &= \{s - (-\zeta\omega_n - j\sqrt{1 - \zeta^2}\omega_n)\} \{s - (-\zeta\omega_n + j\sqrt{1 - \zeta^2}\omega_n)\} \end{aligned} \quad (3.3)$$

となり、 s 平面の第 2, 3 象限で共役複素数となることがわかる。極の実部は減衰係数、虚部は減衰がある系の固有共振周波数に相当する。これらの関係を図 3 に示す^{[4][5]}。モーダルパラメータとしての固有共振周波数は $\sqrt{1 - \zeta^2}\omega_n$ 、すなわち減衰固有振動数 (Hz) で表される。また減衰係

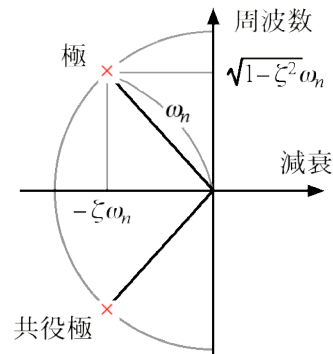


図3 伝達関数の極とモーダルパラメータ

数は $\zeta\omega_n$ (Hz), もしくは非減衰固有周波数 ω_n に対する割合 $\zeta\omega_n/\omega_n = \zeta(\%)$ で表される。この減衰係数は、共振曲線の Q 値と同様に、ピーク曲線の最大値に対するハーフパワーポイントでのピーク幅として計算される。

一方、式(3.2)の R はレジデューと呼ばれ、振幅と位相でモード形状を表すパラメータである。伝達関数はワイヤフレームモデルの節点数だけ測定されるが、同じ共振点に着目すると、共振周波数は原理的に同じとなる。しかし、応答の振幅と信号伝搬時間は節点によって異なる値を持ち、その大きさと位相から固有振動のモード形状が決定される。

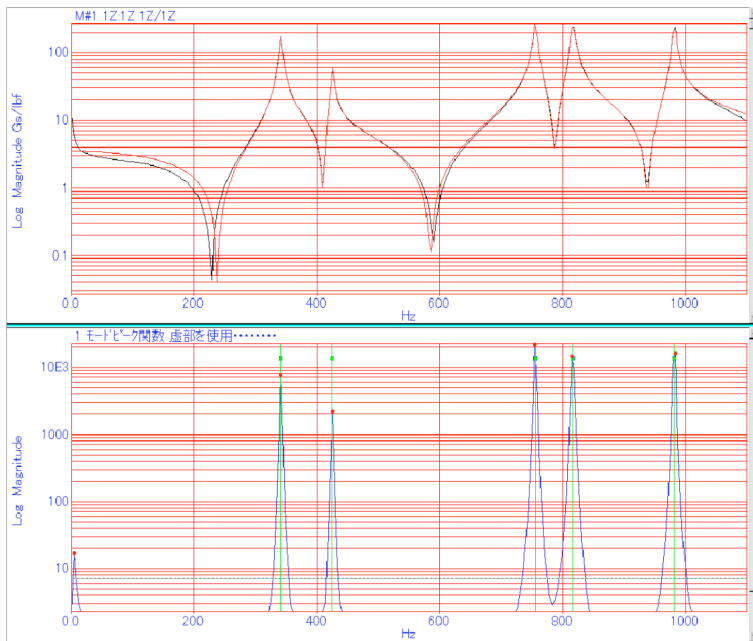
これらのパラメータの抽出は、測定した伝達関数の共振ピークに 2 次遅れ系の伝達関数を当てはめることによ

り行う。これをカーブフィットといい、種々の方法が提案されている。実際の作業はアプリケーションに任せることになるが、モードの近接・重畳具合などによって使い分けの必要がある。

本実験で使用する ME'scopeVES では、図 4(a)(b)に示すように、まず測定した伝達関数より共振点ピークの数进行う。これをカーブフィットといい、種々の方法が提案されている。実際の作業はアプリケーションに任せることになるが、モードの近接・重畳具合などによって使い分けの必要がある。

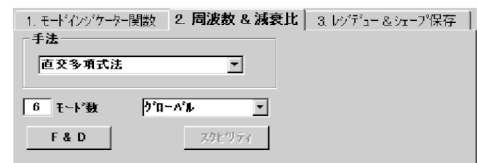
3.4 結果の表示

モーダルパラメータが計算されると、各共振周波数に

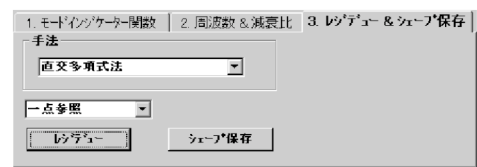


(a) 伝達関数画面

(b) ピークサーチ画面

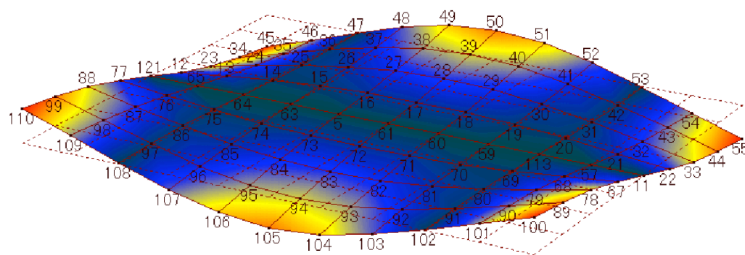


(c) 固有周波数・減衰計算画面



(d) レジデュー計算画面

図4 カーブフィット画面



(a) モードアニメーション

モード	周波数 (Hz)	減衰 (%)	レジデュー(振幅) (g/lb-sec)	レジデュー(位相) (deg)
1	165	1.89	98.6	13.7
2	224	2.95	265	17.4
3	348	1.49	53.1	7.1
4	462	2.36	70.9	13.5
5	493	0.94	303	193
6	635	2.25	162	204
7	1.11E3	0.446	842	205
8	1.21E3	0.585	243	190
9	1.32E3	0.546	468	197
10	1.56E3	1.09	300	198
11	2.09E3	0.264	2.89E3	341
12	2.23E3	0.487	1.83E3	5.07
13	2.34E3	0.226	1.51E3	186

(b) モーダルパラメータ一覧

図5 解析結果

おける構造物の固有振動モードをアニメーション表示することができる。一方、各振動モードにおける固有振動数、減衰係数等は一覧表の形式で確認することができる。

図5にその一例を示す。

3.5 片持ち梁のモーダル解析

上記の概要に示した手順に従って片持ち梁のモーダル解析を行い、理論計算やストレージスコープによる測定結果と比較してみる。

(1) 図6に示すように、装置を構成する。高価な精密機

- 器が多いので、取扱いはくれぐれも慎重に行うこと。
- (2) 実験室に用意されたテキスト「ME'scopeVESによる片持ち梁のモーダル解析」に従ってモーダル解析を行う。
 - (3) レポートに記載するため、測定した固有振動モードのシェーブ画面等、必要なデータは保存しておく。
 - (4) モードシェーブウィンドウから、測定した固有モードの共振周波数と減衰係数を読み取り、表に記録する。(3次モードまで)

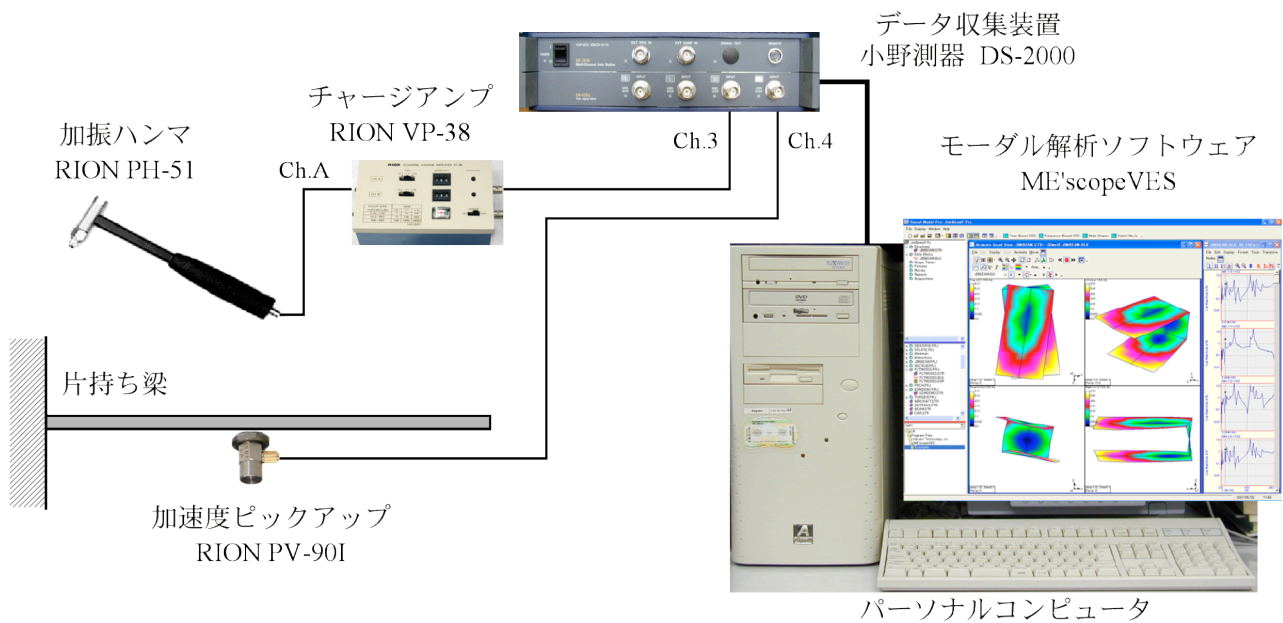


図6 モーダル解析実験装置の構成

4. 実験指導書Ⅱ -片持ち梁の解析手引書-

4.1 プロジェクトの新規作成

- (1) MS-Windows を起動し、デスクトップに作業用フォルダ "Beam" を作成する。
- (2) ME'scopeVES を起動し、"Directory List" より先ほど作成した "Beam" フォルダを開く。
- (3) 図7に示すように、ME'scopeVES ではいくつかのファイルが集まって1つの解析プロジェクトを構成しており、それぞれ種類ごとに専用のフォルダに格納される。
- (4) 本実験で使用するフォルダ(データ)は以下の4つである。

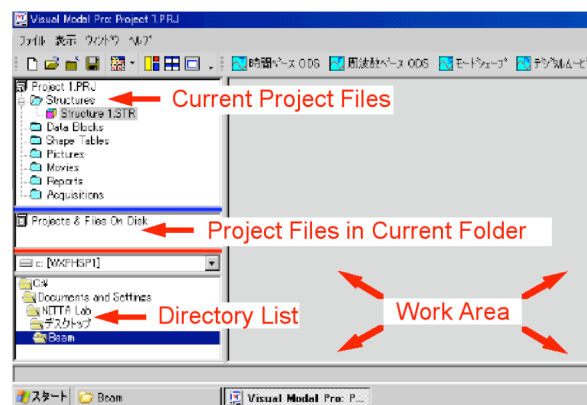


図7 ME'scopeVESの解析画面

Structures フォルダ:

測定対象のモデル (STR ファイル) を格納

Data Blocks フォルダ：

測定した伝達関数等 (BLK ファイル) を格納

Shape Tables フォルダ：

解析したモード形状 (SHP ファイル) を格納

Acquisitions フォルダ：

測定条件の設定情報 (ACQ ファイル) を格納

4.2 モデリング

- (1) 図 8 に示すようなワイヤーフレームモデルを構築する。実際の片持ち梁には z 方向に厚みがあるが、他の方向の寸法に比べて十分小さいので、無視しても差し支えない。

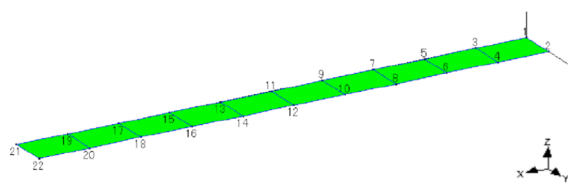


図8 片持ち梁のワイヤーフレームモデル

- (2) 「ファイル」 「新規」 「ストラクチャ」 を選択すると、作図画面が表示され、プロジェクトの "Structures" フォルダにストラクチャファイル "Structure 1.STR" が追加される。
- (3) 作図ウィンドウの「作図」 「作図アシスタント」 を選択すると、基本形状が表示される。上から 3 つめの "四角形" をダブルクリックすると、作図画面に四角形が配置される(図 9)。

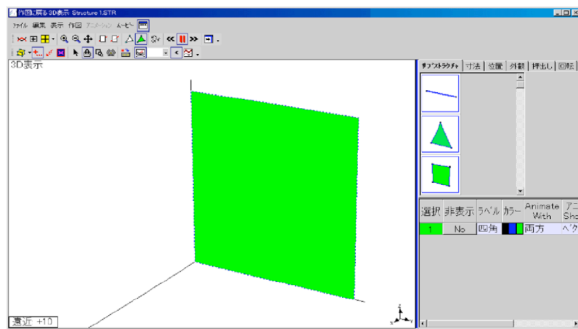


図9 四角形要素の追加

- (4) 作図アシスタントの「寸法」 タブをクリックし、モデル寸法と節点数のパラメータを図 10 のように設定する。(幅 : 38mm, ポイント : 2, 高さ : 500mm, ポイント : 11)
- (5) この状態では yz 平面にモデルが作成されているので、これを y 軸中心に回転させて、 xy 平面のモデルにする。図 11 に示すように、「位置」 タブをクリックし、

パラメータ	値
幅 (mm)	38
ポイント	2
高さ (mm)	500
ポイント	11

図10 モデルの寸法と節点数



図11 モデルの方向回転

"回転" の角度設定 (Deg.) を 90.0 に設定する。次いで "Y" の下矢印をクリックすると、モデルが 90° 回転する。

- (6) 作図ウィンドウの「表示」 「ビューコントロール」 を選択すると、モデルの表示制御ウィンドウが表示される(図 12)。画面上のモデルと、片持ち梁を実際に見た時の形状が同じになるように、表示状態を調整し、画面いっぱいにズームしておく。

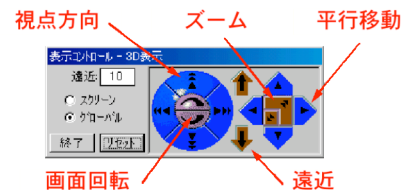


図12 ビューコントロールの機能

- (7) 最後に節点番号を割り付ける。作図ウィンドウの「作図」 「ポイント番号」 「ポイント番号指定」 を選択すると、「ポイントの番号付け」 サブウィンドウが表示され(図 13)、指定した節点数のポイント一覧表が生成される。実際の片持ち梁に記載された順番に合わせて、モデルの節点を順番にクリックし、番号付けを行う。

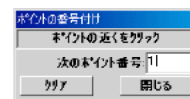


図13 ポイント番号付け画面

- (8) 以上で図 8 のモデルが完成する。「ファイル」 「保存」 メニューより、プロジェクトとストラクチャをファイル名 "Beam" で保存する。両者は別ファイルなので、それぞれ保存が必要である。

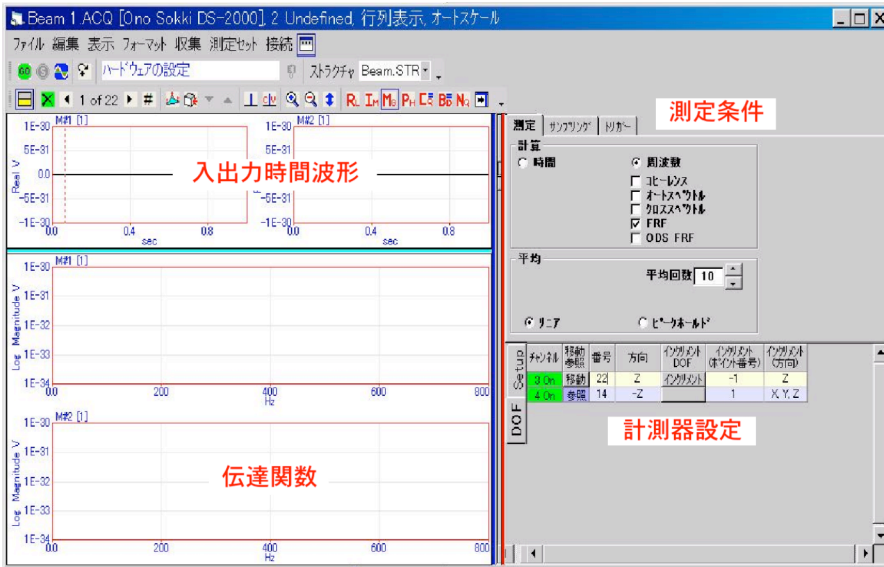


図14 データ収集画面



図15 ハードウェア選択画面

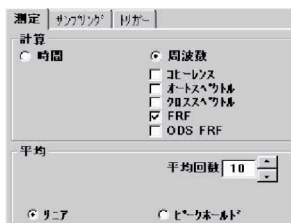


図16 測定条件設定画面



図17 サンプリング条件設定画面



図18 トリガ条件設定画面

4.3 伝達関数の測定

- (1) 実験装置をセットアップする。
- (2) 「ファイル」「新規」「データ収集」を選択すると、図14に示すデータ収集画面が表示される。
- (3) 「接続」「ハードウェア」を選択すると、図15に示すハードウェア選択ウィンドウが表示されるので、「Ono Sokki DS-2000」を指定する。
- (4) 「測定」「サンプリング」「トリガ」タブを開き、以下のように設定する(図16~18)。

[測定]

計算: "周波数", "FRF" 平均: "リニア", "10回"

[サンプリング]

サンプル数: "2048" 最大周波数: "1024Hz"

[トリガ]

フリー/トリガ: "トリガ" ソース: "Ch.3"
 勾配: "+" "Show", "Lock"
 レベル: "5.0" プリトリガ: "128"

- (5) 「Setup」「DOF」タブを開き、以下のように設定する(図19, 20)。DOFとは "Degree of Freedom" の略で "自由度" のことであるが、ここでは測定軸の方向

を表す。本実験では xy 平面で厚さのないモデルを作成したので、 z 方向の振動のみを測定する。

[Setup]

チャンネル: "1,2 Off, 3,4 On"
 センサ: "Ch.3 BNC, Ch.4 Sensor 2.0mA"
 電圧レンジ: "Ch.3,4 とも 0.447"
 Input/Output: "Ch.3 Input, Ch.4 Output"

[DOF]

移動/参照: "Ch.3 移動, Ch.4 参照"
 ポイント番号: "1" 方向: "z"
 インクリメント DOF: "Ch.3のみ"

DOF Setup	チャンネル	レベル	DOF	カップリング	センサー	電圧レンジ	Input Output	単位	表示
1 Off				AC	BNC	141	Output	V	EU
2 Off				AC	BNC	141	Output	V	EU
3 On			12	AC	BNC	0.447	Input	V	EU
4 On			-102	AC	Sensor 2.0mA	0.447	Output	V	EU

図19 計測器設定画面

DOF Setup	チャンネル	移動参照	番号	方向	インクリメント DOF	インクリメント (単位番号)	インクリメント (方向)
3 On	移動	5	Z		1		Z
4 On	参照	10	-Z		1		X, Y, Z

図20 DOF設定画面

- (6) 「測定セット」「測定セット数」を選択すると、図 21 に示すように、全測定数を入力するサブウィンドウが開く。ここではz方向のみ、節点の数だけ測定すればよいので、「22」を入力する。あわせて「Auto-Increment DOFs (DOFの自動更新)」にチェックを入れておく。

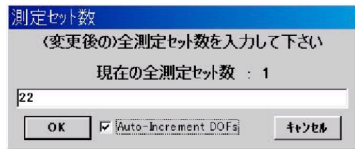


図21 測定セット設定画面

- (7) 「収集」「スタート」を選択すると測定状態に入る。梁の節点 No.1 から順次 10 回ずつインパルス加振して、伝達関数を測定する。二重打ちにならないように注意すること。
- (8) 測定中は[計測中]⇒[計測終了]⇒[トリガ設定(平均〇〇 of 10)]の表示を繰り返す。入力オーバーの場合は[オーバーロード]と表示され、データは取り込まれないので、そのまま加振を継続すればよい。二重打ちなどで計測データが不良になった場合には計測を停止し、改めてデータを収集する。
- (9) 10 回の平均が終了するとデータ収集が停止するので、「収集」「保存」により、データを保存する。最初に保存するときは、データブロックのファイル名を尋ねてくるので"Beam"と入力する。
- (10) データを保存すると、図 22 に示すように、測定された伝達関数と、保存されたデータの一覧を示すデータブロックウィンドウが表示される。これを見ながら、測定セットを 1 つずつ進め、全節点における伝達関数を測定する。

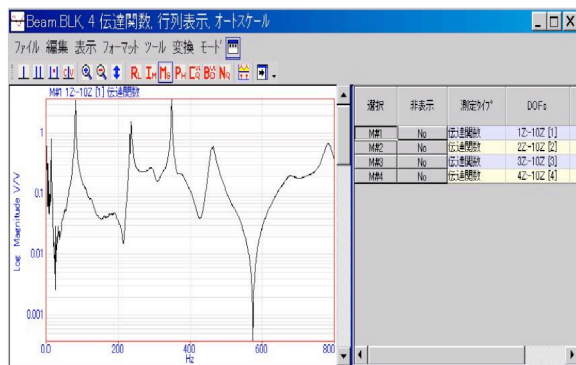


図22 データブロック画面

※ 測定中の節点 No.と図 19 に示す計測器設定画面の移動点(Ch.3)の DOF No.が一致しているかどうか、常に確認しながら

ら進めること。さもないと、4.5(2)において、各節点へのデータの割り付けに支障を来す。

4.4 モーダルパラメータの計算

- (1) プロジェクトファイルの一覧からデータブロックファイル"Beam.BLK"を開く。測定した伝達関数と、それぞれのプロパティが一覧表に表示される(図 23)。
- (2) 伝達関数は重ね描きしておくこと、共振点がわかりやすい。もし、重ね描き表示になっていない場合は「フォーマット」「トレースをオーバーレイ」を選択する。縦軸の表示は「(対数)振幅」もしくは「虚部」が適している。

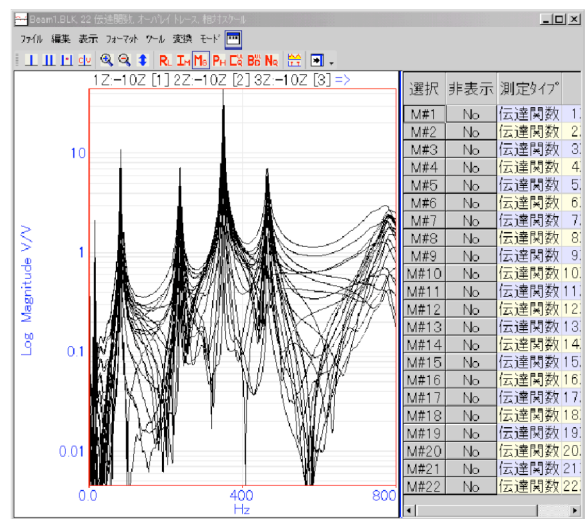


図23 データブロック画面での全測定データ表示

- (3) モーダルパラメータの計算は FRF (周波数応答関数) の形で行うので、まず測定データのタイプを変更する。プロパティ一覧表のタイトル「測定タイプ」の部分をクリックすると、図 24 のサブウィンドウが表示される。ここで FRF を選択して、OK をクリックすると、データタイプが変更される。

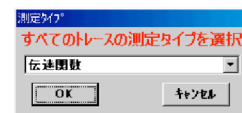


図24 測定データタイプの設定

- (4) モーダルパラメータの計算は、1.モード数(共振ピーク数)の推定、2.共振周波数と減衰係数の計算、3.モード形状の計算の順に進められる。
- (5) まず、計算に使用する全データを選択する。「編集」「トレースの選択」「全て」によって行い、一覧表の

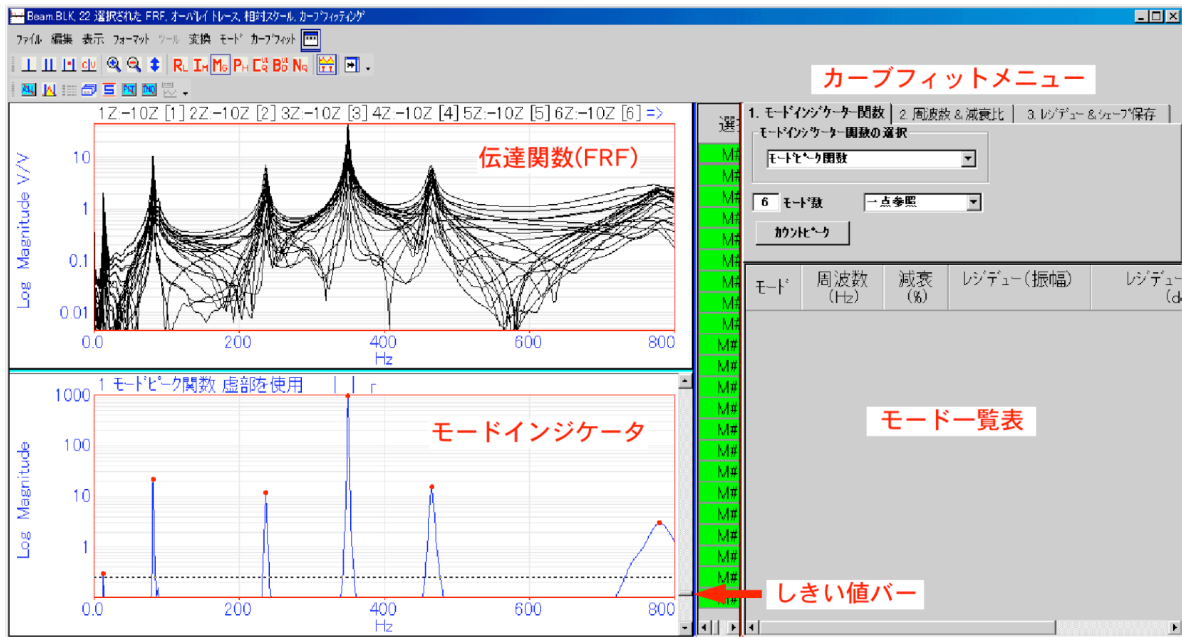


図25 カーブフィット画面

「選択」のトレース番号が全て緑色でハイライトされればよい。

- (6) 次に、「モード」「モーダルパラメータ」を選択すると、図 25 に示すカーブフィット画面が表示される。
- (7) 共振点の数を推定するために、「1.モードインジケータ関数」タブを選択し、図 26 のように、モードインジケータ関数の選択：“モードピーク関数”，“一点参照”に設定する。

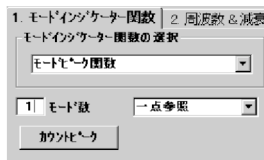


図26 モードインジケータ設定画面

- (8) この画面の「カウントピーク」ボタンをクリックすると、図 27 のように、複素データのどの形式を使って計算するか尋ねてくる。本実験では応答点に加速度ピックアップを使用しているので「虚部」を指定する。

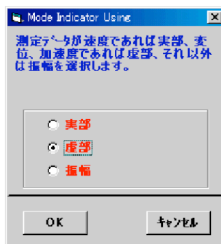


図27 複素データの形式指定

- (9) この画面の「OK」をクリックすると、ピーク位置が推定され、結果がモードインジケータウィンドウに表示される。
- (10) 本実験の測定対象である金属バーなどは、共振が比較的顕著に現れる。したがって、伝達関数からも、測定範囲内に 6 つの共振点があることが容易に読み取れる。そこで、モードインジケータのしきい値バーの位置を調整し、6 つのピークがカウントされるように調整する。(図 25 参照)

※ 測定対象によっては複雑な固有モードを持ち、大小多数の共振ピークを持つ場合がある。このときには、最終結果を見ながら、一連の解析手順において種々の方法を試すことも必要である。

- (11) 次に「2.周波数&減衰」タブをクリックし、先ほど定めた共振点における固有周波数と減衰を計算する。図 28 に示すように、手法は“直交多項式”で“グローバル”に行う。

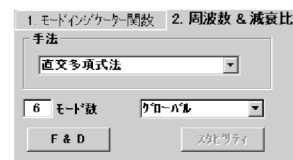


図28 カーブフィット手法の選択

※ カーブフィットの手法には様々なものがあるが、“直交多項式法”は現在一番汎用性の高い手法で、周波数領域の計算

法である。伝達関数の部分分数多項式を有理関数式に置き換えて最小2乗近似を行う。

ところで、今回は操作の簡便さから「直交多項式法」を用いることとした。本来、金属のように減衰が小さい(振動しやすい)系では共振ピークが鋭くなるので、周波数領域では分解能が悪い。逆に、時間領域(複素指数法)では信号が長時間持続し、データを有効に利用できるので精度に優れる。

一方、「グローバル」とは測定した伝達関数を全部まとめて計算に使うことをいう。例えば、加速度ピックアップを移動(加振点固定)して測定した場合など、その付加質量の影響によって共振点変動することがある。こうしたケースでは、個々の伝達関数ごとにカーブフィットを行う「ローカル」の方が良い結果を得られることもある。付録の付表1に、各種のカーブフィット手法の分類と特徴を示す。

- (12) 「F&D」ボタンをクリックして計算を開始する。途中、計算条件を確認するメッセージが表示されるが、そのまま「はい」で継続する。
- (13) 計算が完了するとモードインジケータ画面に、共振の中心周波数(固有周波数)が緑色で、減衰幅が青色で表示される(図29)。そして、図30のように、計算結果の一覧表も表示される。

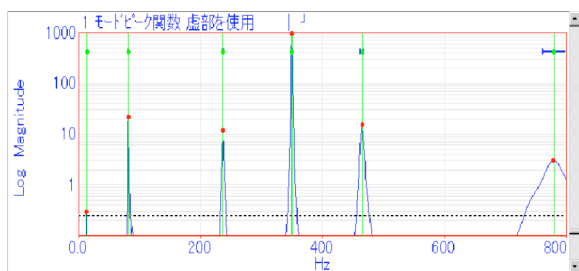


図29 共振の中心周波数と減衰幅

モード	周波数 (Hz)	減衰 (%)
1	13.4	0.466
2	81.5	0.721
3	236	0.698
4	350	0.248
5	465	0.732
6	780	2.44

図30 固有周波数と減衰値

- (14) 最後にモードシェープを計算する。「3.レジデュー & シェープ保存」タブをクリックし、「手法:直交多項式法」「一点参照」として「レジデュー」ボタンをクリックする。途中、計算条件を確認するメッセージが表示されるが、そのまま「はい」で継続する(図31)。
- (15) 計算が完了すると、伝達関数ウィンドウにカーブフィットによって計算されたFRF曲線が赤色で重ね描きされる(図32)。

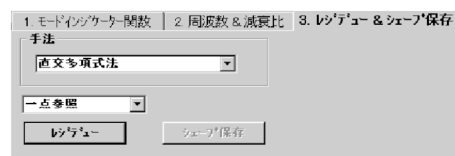


図31 モードシェープの計算

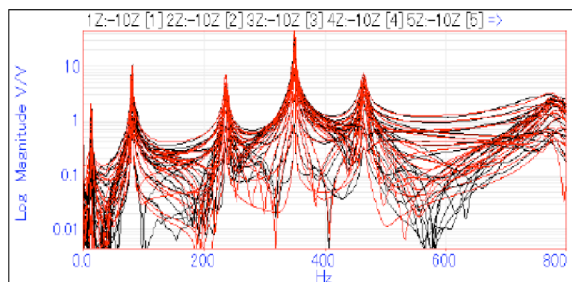


図32 カーブフィットで求められたFRF

- (16) 「シェープ保存」ボタンをクリックすると、シェープデータが一時保存される。保存先を尋ねてくるので、「新規」を選択し、「Beam」という名称で保存する。すると、プロジェクトの「Shape Tables」フォルダに「Beam.SHP」というファイルが作成される。

※ この時点ではプロジェクトに登録されるだけであって、実際にHDDに保存されるのではない。次の「プロジェクト保存」を行う際に、実際のシェープデータの保存が必要である。(表示メッセージに従えばよい。)

- (17) 「ファイル」「プロジェクト」「保存」を選択し、これまでの作業内容を保存する。以上でモードパラメータの計算は完了である。

4.5 結果の表示

- (1) プロジェクトウィンドウからストラクチャファイル「Beam.STR」とシェープファイル「Beam.SHP」を開き、図33のようにレイアウトする。3Dモデルは表示コントロールによって、適当な角度・大きさに調整する。

※ この時点では、モードシェープとストラクチャが関連付けられておらず、モードアニメーションは表示されない。

- (2) シェープウィンドウにおいて、「ツール」「トレースの割付」を選択する。図34に示す設定画面が表示されるので、「ポイントの番号とDOFsが一致」をチェックして「OK」をクリックする。正常に実行されればメッセージが表示され、22点の節点へのモードシェープの割り付けが完了する。
- (3) 以上より、モードアニメーションが表示可能である。シェープウィンドウの「ツール」「アニメーションシ

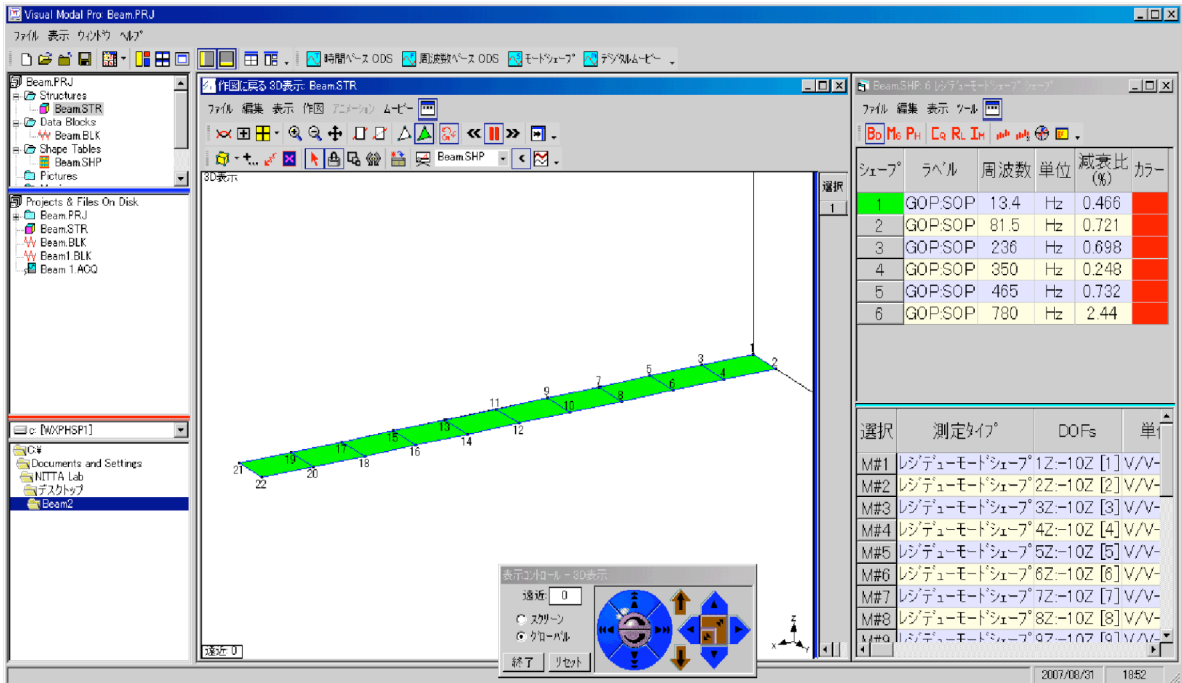


図33 モードアニメーション画面

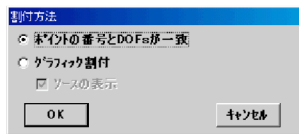


図34 トレースの割付設定

「シェープ」を選択すると、ストラクチャウィンドウでアニメーションが開始される。

(4) 表示するモードの切り換えはシェープウィンドウのモードの一覧表において、「シェープ」欄の番号をクリックする。観測される固有モードシェープの例を図35に示す。

4.6 アニメーション画面の操作メニュー

モードアニメーションを観察する際に使用する主要メニューを図36に示す。

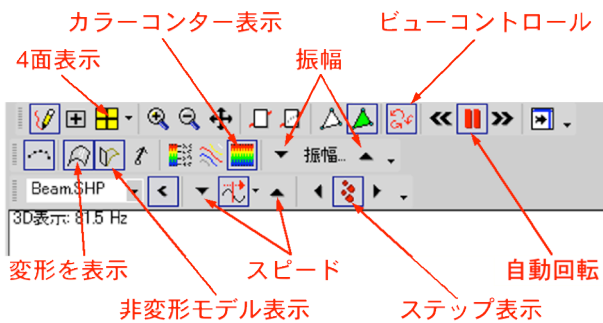
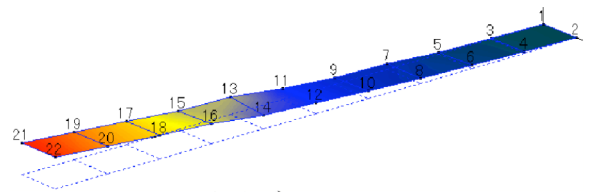
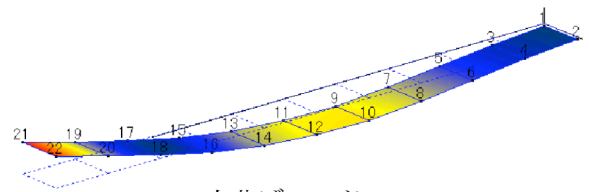


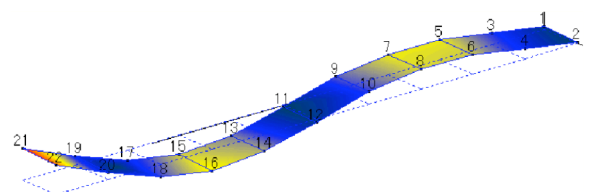
図36 モードアニメーションの主要メニュー



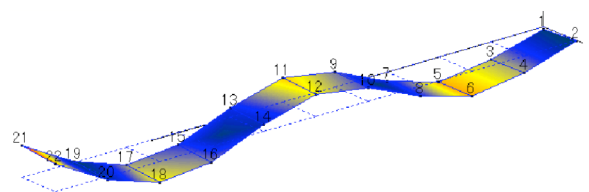
(a) 1次曲げモード 13.4Hz



(b) 2次曲げモード 81.5Hz



(c) 3次曲げモード 236Hz



(d) 4次曲げモード 465Hz

図35 固有モードシェープの例

付録 カーブフィット手法の分類とその特徴^[6]

付表1 各種カーブフィット手法の分類とその特徴

参照方法	自由度	使用FRF	手法
一点参照 ひとつの参照点を用いる。対称構造物など、重根があるケースでは、これを分解・認識できないので不適である。	SDOF (一自由度) 固有モードをひとつずつ計算する。近接モードがあると誤差が大きいため、各ピーク曲線が十分離れている場合に有効である。	Local (ローカル) 個々のFRFでそれぞれ固有周波数と減衰を求め、モードごとに平均する。ピックアップの質量付加などによって、ピーク値にばらつきがある場合に有効である。ただし、局所に変形が集中するローカルモードや移動点が節になるモードには対応できない。	CoQuad (コクアド)法 FRFの実数部、もしくは虚数部のピーク値をレジデューとする。
	MDOF (多自由度) 複数の固有モードを同時に計算する。近接モードを分解することができない。また参照点が節となる場合、モードを見落とすことがある。	Global (グローバル) 全FRFを使用して各モードの固有周波数と減衰を一気(唯一)に算出する。Local法の欠点を解消できるが、データのばらつきがないように収集することが重要である。	Peak (ピーク)法 指定したバンド内のデータを用いてモード周波数を算出する。
MIMO (多点参照) 複数の参照点を用いる。近接モードや重根を分解でき、モードの見落としが少ない。			Ortho-Polynomial (直交多項式)法 FRFを部分分数多項式に展開し、周波数領域で計算を行う。減衰が大きい系で共振ピーク付近の狭い周波数バンドで計算する場合に有効である。
			Z-Polynomial (Z多項式)法 Z変換を利用した周波数領域での計算法で、比較的高減衰、かつ複雑なモードをもつ系の解析に適す。
		多点参照法では複数のFRF系列を使用する。	Complex Exponential (複素指数)法 最小二乗法を用いて、インパルス応答関数のセットから、FRF固有多項式の係数を時間領域で計算する。減衰が小さい系において、広い周波数バンドを用いて計算する場合に有効である。



5. あとがき

電気情報工学科に導入(更新)されたモーダル解析ソフトウェア ME'scopeVES を紹介した。本稿では、改訂した学生実験指導書を引用したことから、基本機能を解説するに留まっている。今回紹介できなかったその他の有益な機能としては以下のものがある。

(1) 画像トレースによるモデリング機能

複雑な形状の対象物をモデリングする場合、それを撮影した写真を編集画面に表示し、節点とする部分をマウスでクリックする。これより、座標データ入力を簡略化でき、モデル作成が容易になる。

(2) 実稼働変形アニメーション

同期して測定した時間データ、もしくは FRF データを直接節点に割り当てることにより、測定対象の振動の経時変化、もしくは任意の周波数における振動状態をアニメーション表示できる。

(3) モード相関係数

モード相関係数(Modal Assurance Criterion)でモード同士の形状比較を行うことにより、解析した固有モードの妥当性を検証することができる。

(4) MIMO 解析

多点参照(Multi-Input/Multi-Output)解析を行うことにより、近接した固有モードの分離や対称形状の測定物に存在する重根モード(同じ共振周波数で異なるモード形状を持つもの)を解析できる。

(5) 外力応答シミュレーション

MIMO 解析によって求めたモーダルパラメータなどから FRF マトリクスを計算すると、外力に対する応答、ならびに応答を発生させる外力を計算することができる。

(6) デジタルムービー、レポート機能

モードシェープアニメーションは AVI 形式で動画として保存できる。また、MS-Word 簡易版のレポート作成機能があり、ME'scopeVES の同一アプリケーション内で文書の編集ができる。編集した文書は RTF 形式で保存されるので、他のアプリケーションでの編集も可能である。

これらの機能については、また機会を改めて実例を紹介したいと考えている。

以上のように、新システムはモデリング機能や解析精度が大幅に向上し、学生実験のみならず、技術相談などの実践的な使用目的にも耐えうるものである。今後は実

験内容の高度化を適宜進めるとともに、活用の一層を広げるように努めたい。

謝 辞

本設備は平成 18 年度高専教育充実設備費により導入された。この場を借りて、関係各位に謝意を表したい。

文 献

- [1] Vibrant Technology Inc. : <http://vibtech.com/go.cfm/en-us/content/index?>
- [2] (株)システムプラス : <http://www.systemplus.co.jp>
- [3] (株)小野測器 : <http://www.onosokki.co.jp/>
- [4] ME'scopeVES マニュアルリファレンス編, pp.218-219, (株)システムプラス, 2005
- [5] 長松昭男「モード解析入門」, pp.36-40, コロナ社, 1999
- [6] ME'scopeVES マニュアルチュートリアル編, pp.135-138, (株)システムプラス, 2005