

**IMAC XXIX Round Robin  
Experimental Modal Analysis  
実験モーダル解析**

Copyright 1994-2011, Dynamic Design Solutions NV (DDS).

本ドキュメントの原本は、Dynamic Design Solutions NV (DDS) が保有しています。ドキュメント内容については、既に公開されていますが、DDS に許可なく、任意の目的で、複製、転載は厳禁とさせていただきます。ご利用のシステム環境の不適合のため一部は正しく再生されなかったり、情報検索が正しく実行されない場合があるかもしれません。尚、このドキュメント情報は予告なしに変更する場合がございます。

本ドキュメントに記述されたソフトウェアは、ライセンス契約者および保持契約者への参考文献としてリリースされています。Dynamic Design Solutions NV (DDS) は同様のドキュメントや関連資料を提供していますが、ソフトウェア・システム上での使用における差異や結果については、使用者の責任となります。

FEMtools は Dynamic Design Solutions NV (DDS) の登録商標です。このドキュメントに紹介された他のすべての商標や製品はそれぞれ商標あるいは登録商標に委ねられています。

Version 3- Februari 2011

Part No. FTMPE

Dynamic Design Solutions NV (DDS)

Interleuvenlaan 64 – 3001 – Leuven – Belgium

Phone +32 16 40 23 00 – Fax +32 16 40 24 00

info@femtools.com – www.femtools.com

## はじめに

このレポートは、IMAC XXIX で発表された実験モーダル解析（EMA）に関するモーダル・パラメータ・エクストラクター（MPE）のフレームワークを示します。

## 例証 1 — 比例減衰

### イントロダクション

ここで使用されたデータは解析的データセットであり、図 1 に示すモデルモデルから生成されました。そのテスト・データの生成には、比例減衰  $C=0.0001K+0.05M$  が使用され、バンド外モードを含まない 36 の測定データセットが生成されました。

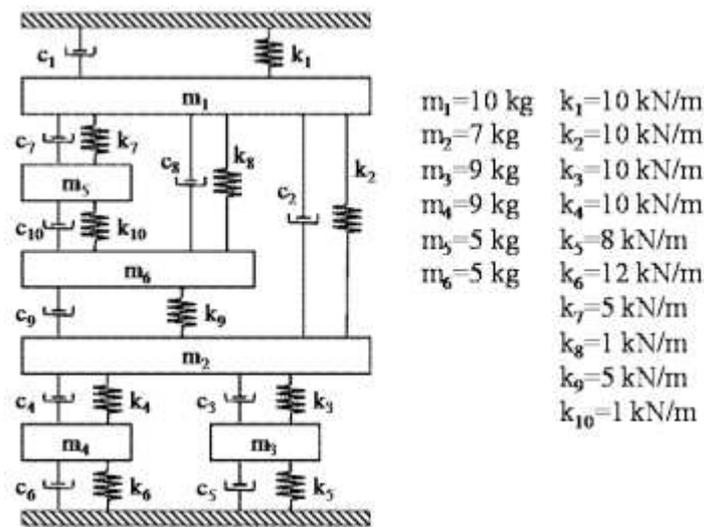


図 1 テスト・データの生成に使用された集中質量ーสปリンガーダンパーのモデル

### FEMtools MPE ツールボックスのセッティング

次のセッティングがモーダル・パラメータを識別するために使用されました。

Parameter	Value
Maximum order	40
Minimum frequency	2
Maximum frequency	15
Minimum damping ratio [%]	0
Maximum damping ratio [%]	40
Maximum frequency deviation [%]	1
Maximum damping deviation [%]	5
Exponential windowing [%]	No
Fast stabilization	No

表 1 FEMtools モーダル・パラメータの識別に使用したセッティング

## 推定モード

次のモーダル・パラメータが推定されました。

Mode	Frequency [Hz]	Damping [%]	MPC [%]	MPD [°]	Max MAC
1	3.506	0.22	100.00	0.00	3.21
2	5.493	0.25	100.00	0.00	2.70
3	6.427	0.26	100.00	0.00	3.07
4	7.552	0.29	100.00	0.00	0.49
5	8.388	0.31	100.00	0.00	3.21
6	12.641	0.43	100.00	0.00	1.00

表 2 FEMtools MPE によって推定されたモーダル・パラメータ

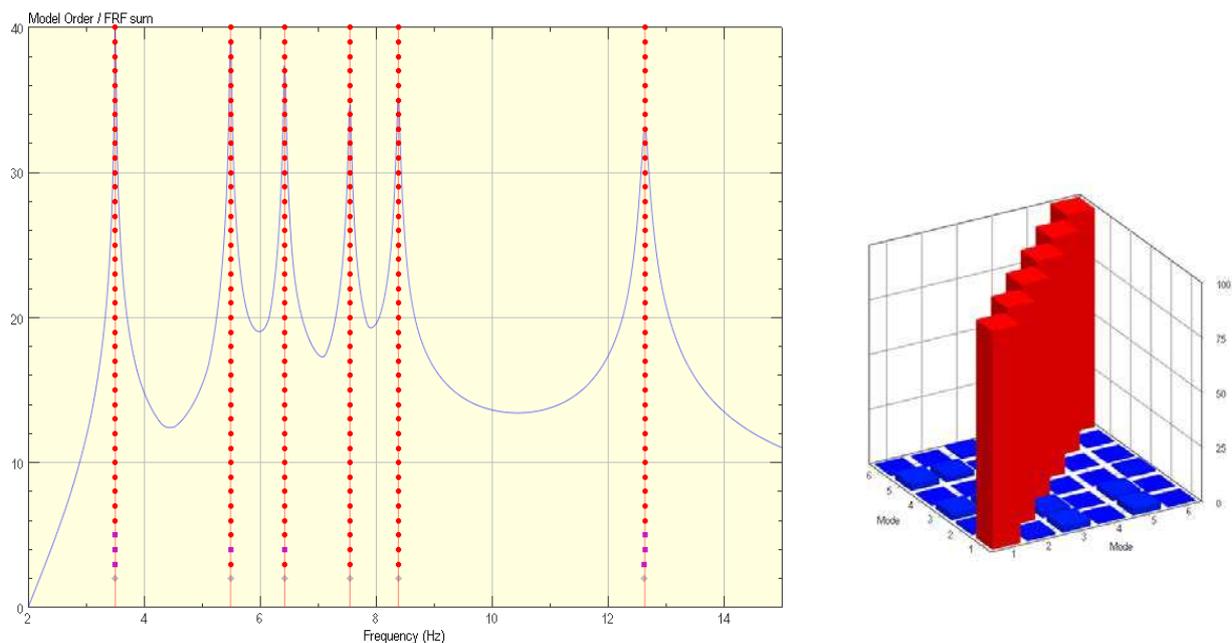


図 2 安定化チャート (左) と推定されたモードの Auto MAC (右)

## 例証 2 — 非比例減衰

### イントロダクション

ここで使用されたデータは解析的データセットであり、図 3 に示すモデルから生成されました。そのテスト・データの生成には、非比例減衰  $C1=5.1\text{N/m/s}$ 、 $C2=7.5\text{N/m/s}$ 、 $C3=3.9\text{N/m/s}$ 、 $C4=4.3\text{N/m/s}$ 、 $C5=2.96\text{N/m/s}$ 、 $C6=4.32\text{N/m/s}$ 、 $C7=3.65\text{N/m/s}$ 、 $C8=0.58\text{N/m/s}$ 、 $C9=2.85\text{N/m/s}$ 、 $C10=0.37\text{N/m/s}$  が使用され、バンド外モードを含まない 36 の測定データセットが生成されました。

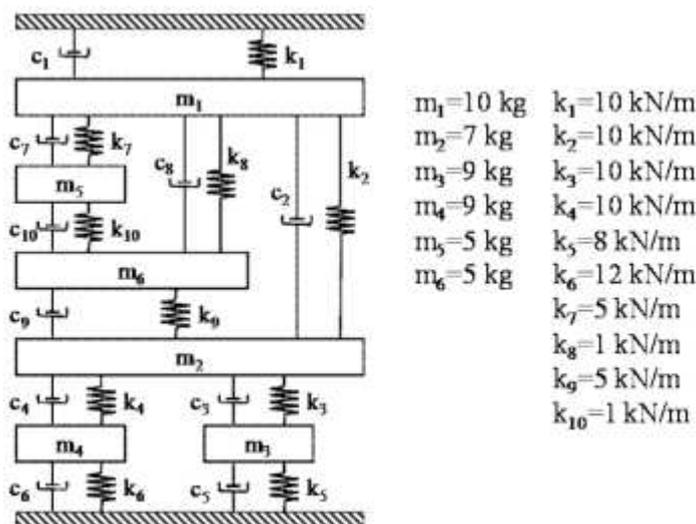


図 3 テスト・データの生成に使用された集中質量ーสปリンガーダンパーのモデル

### FEMtools MPE ツールボックスのセッティング

次のセッティングはモーダル・パラメータを識別するために使用されました。

Parameter	Value
Maximum order	40
Minimum frequency	2
Maximum frequency	15
Minimum damping ratio [%]	0
Maximum damping ratio [%]	40
Maximum frequency deviation [%]	1
Maximum damping deviation [%]	5
Exponential windowing [%]	No
Fast stabilization	No

表 3 FEMtools モーダル・パラメータの識別セッティング

## 推定モード

次のモーダル・パラメータが推定されました。

Mode	Frequency [Hz]	Damping [%]	MPC [%]	MPD [°]	Max MAC
1	3.50586	0.01	100.00	0.00	3.21
2	5.49339	0.01	100.00	0.00	2.70
3	6.42713	0.01	100.00	0.00	3.07
4	7.55186	0.01	100.00	0.00	0.49
5	8.38774	0.01	100.00	0.00	3.21
6	12.6407	0.01	100.00	0.00	1.00

表 4 FEMtools MPE による推定モーダル・パラメータ

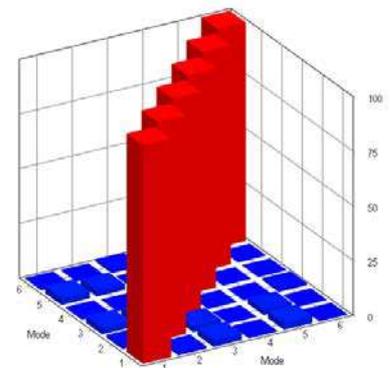
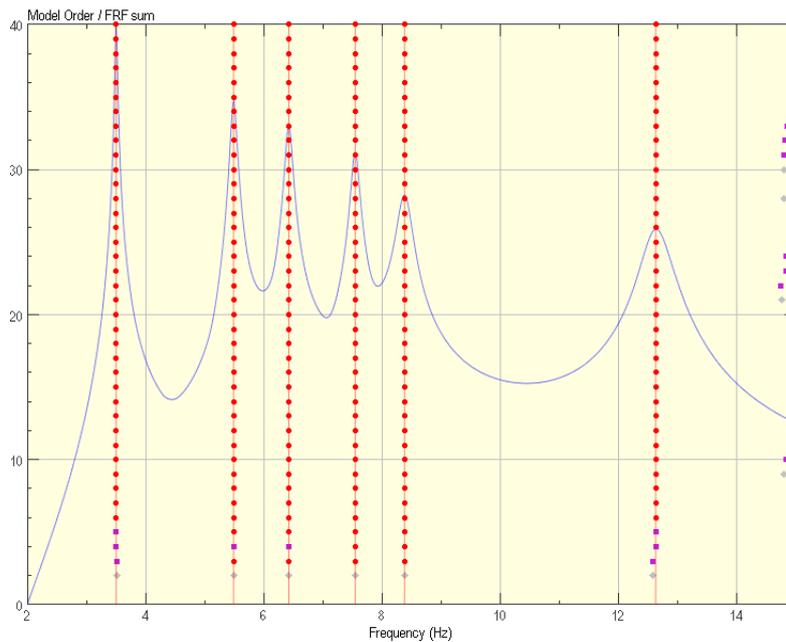


図 4 安定化チャート (左) と推定モードの Auto MAC (右)

## 例証 3 コンスタント・モーダル減衰

### イントロダクション

ここで使用されたデータは解析的データセットであり、図 5 に示すモデルから生成されました。そのテスト・データの生成には、一定モード減衰として、0.01%が使用され、バンド外モードを含まない 36 の測定データセットが生成されました。

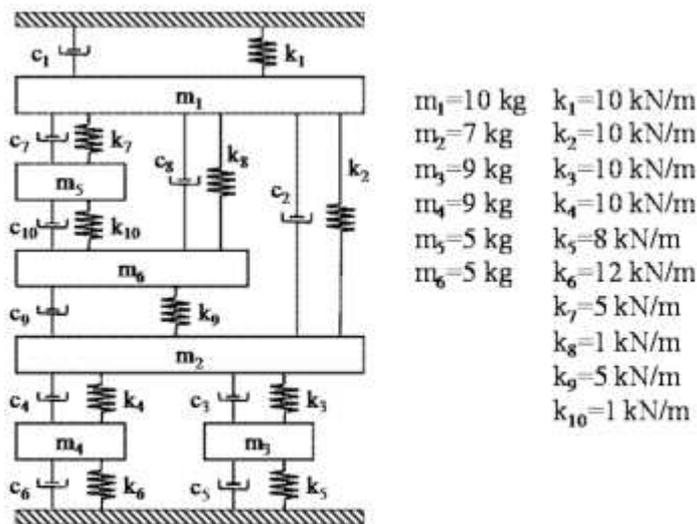


図 5 テスト・データの生成に使用された集中質量ーสปリンガーダンパーのモデル

### FEMtools MPE ツールボックスのセッティング

次のセッティングがモーダル・パラメータを識別するために使用されました。

Parameter	Value
Maximum order	40
Minimum frequency	2
Maximum frequency	15
Minimum damping ratio [%]	0
Maximum damping ratio [%]	40
Maximum frequency deviation [%]	1
Maximum damping deviation [%]	5
Exponential windowing [%]	No
Fast stabilization	No

表 5 FEMtools モーダル・パラメータの識別セッティング

## 推定モード

次のモーダル・パラメータが推定されました。

Mode	Frequency [Hz]	Damping [%]	MPC [%]	MPD [°]	Max MAC
1	3.50586	0.01	100.00	0.00	3.21
2	5.49339	0.01	100.00	0.00	2.70
3	6.42713	0.01	100.00	0.00	3.07
4	7.55186	0.01	100.00	0.00	0.49
5	8.38774	0.01	100.00	0.00	3.21
6	12.6407	0.01	100.00	0.00	1.00

表 6 FEMtools MPE による推定モーダル・パラメータ

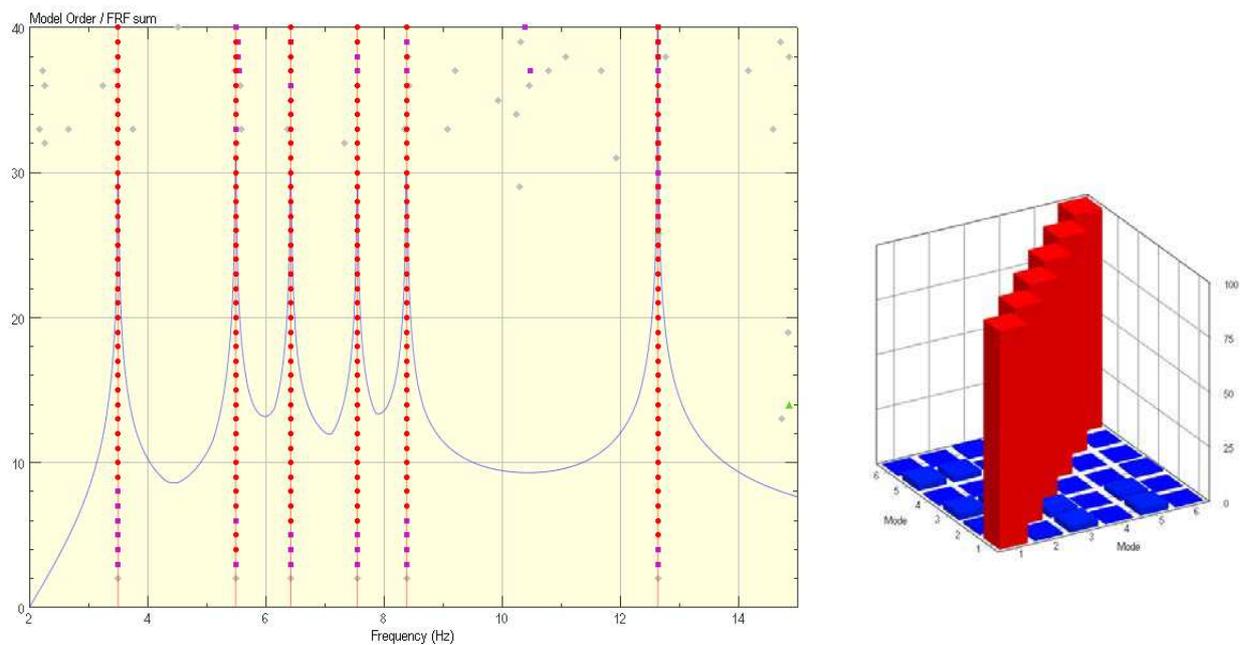
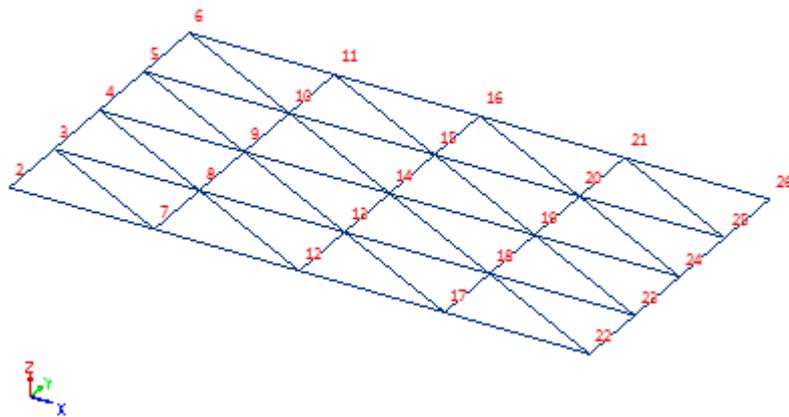


図 6 安定化チャート (左) と推定モードの Auto MAC (右)

# プレキシ・プレート

## イントロダクション

プレキシ・プレート (Plexi Plate) データセットは、プレキシガラス・プレート (寸法 53cm×32cm×1.5cm、フリー/フリー境界条件) 構造のモーダル実験から収録されました。その測定は、8 つの 3 軸の加速度センサーを使用し、3 回の測定実験が試行されました。また、3 点同時ソースのランダム加振およびリークエジャーの縮小するためにハニング・ウィンドウ補正を使用しました。データセットとして、3 つの参照点に対する 75 のレスポンス DOF の FRF とコヒーレンス関数が測定されました。このプレートは第 1 共振ピークにおいて、2 つのモード (重根モード) を持つように設計されています。



## FEMtools MPE ツールボックスのセッティング

Parameter	Value
Maximum order	60
Minimum frequency	10
Maximum frequency	1600
Minimum damping ratio [%]	0
Maximum damping ratio [%]	40
Maximum frequency deviation [%]	1
Maximum damping deviation [%]	5
Exponential windowing [%]	No
Fast stabilization	No

表 7 FEMtools モーダル・パラメータの識別セッティング

## 推定モード

次のモーダル・パラメータが推定されました。

Mode	Frequency [Hz]	Damping [%]	MPC [%]	MPD [°]	Max MAC
1	99.692	5.32	77.96	44.10	73.40
2	100.081	4.86	62.52	46.62	73.40
3	226.429	3.76	94.27	36.04	13.83
4	279.339	3.71	82.28	39.11	13.01
5	290.811	3.49	73.22	44.03	13.10
6	355.599	3.42	99.24	26.65	9.76
7	417.331	3.26	99.33	21.96	14.40
8	502.900	3.25	99.06	25.46	7.98
9	568.452	2.94	99.20	21.83	6.00
10	672.699	3.14	98.18	20.64	13.83
11	742.856	2.97	98.26	26.85	15.09
12	831.211	1.42	87.15	38.26	25.06
13	847.190	1.38	76.97	51.11	40.33
14	871.577	1.06	97.85	19.87	40.33
15	887.916	0.89	79.48	47.37	25.37
16	936.383	1.08	90.82	33.48	21.04
17	970.217	2.29	82.06	38.20	16.57
18	1014.886	2.32	93.31	27.26	21.04
19	1041.086	2.85	92.50	34.96	16.67
20	1070.144	2.90	86.79	39.14	17.48

表 8 FEMtools MPE による推定モーダル・パラメータ

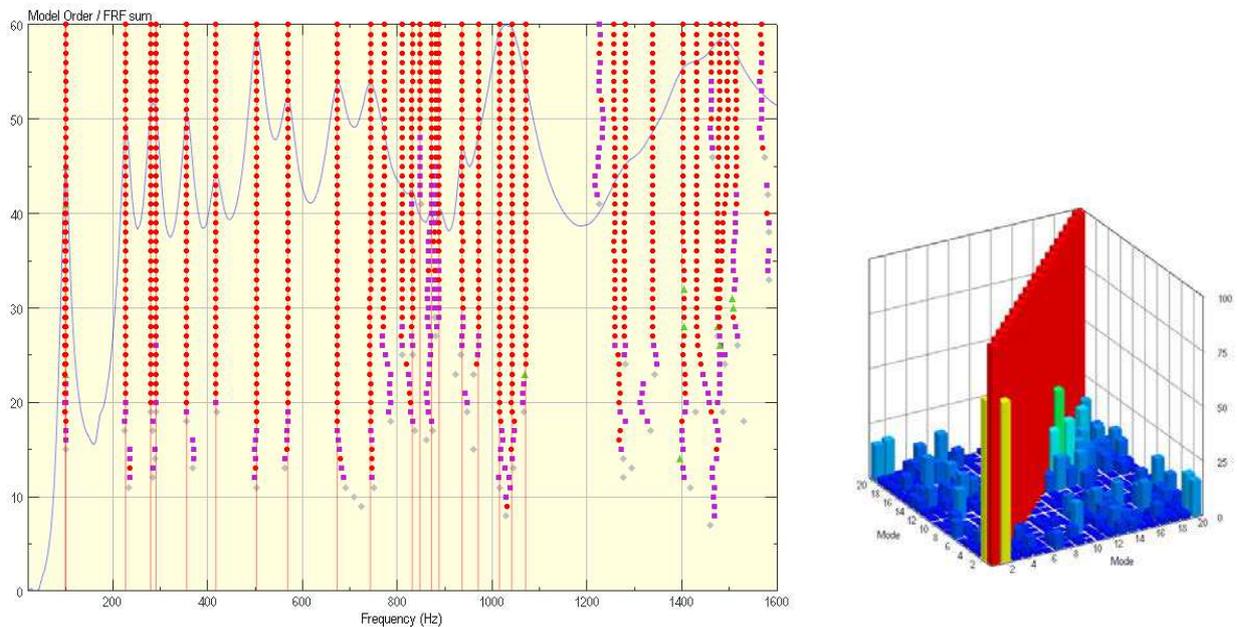


図 7 安定化チャート (左) と推定モード (右) の Auto MAC

プレートの最初の2つのモードが同一周波数（重根モード）を持つように設計され、その2つのモードは容易に識別できます。それらのモードシェープを正確に分離するには技術的な検討が必要とされ、第1モードは「ねじれモード」であり、第2モードは、屈曲モードを呈しているように見えていますが、2つの識別されたモードは2つの基本モードのコンビネーションです。

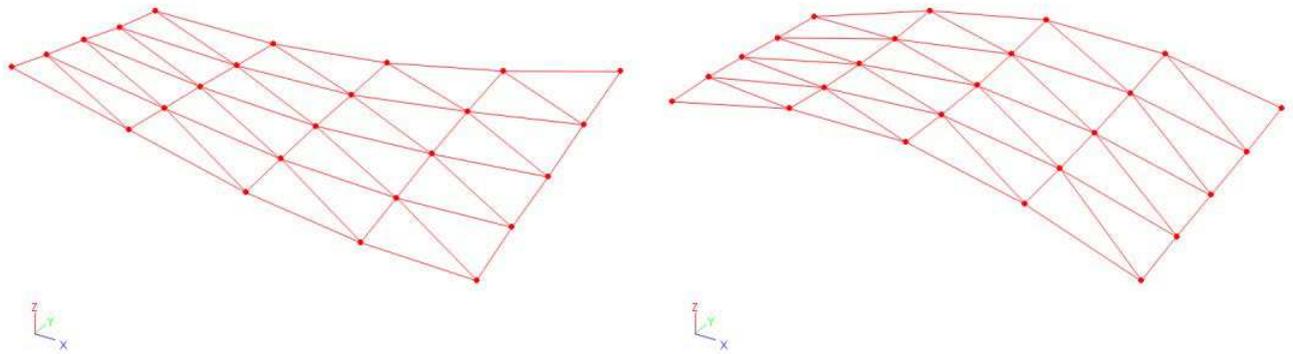


図8 モード1（左）とモード2（右）のモードシェープ

## ドライヤー・キャビネット

### イントロダクション

ドライヤー・キャビネット (Dryer Cabinet) データセットは、家庭用衣類乾燥機キャビネットのモーダル実験から収録されました。データセットは、4つの参照点に対する300のレスポンスDOFのFRFとコヒーレンス関数が測定されました。データセットには、イナータンス (加速度/力) とモビリティ (速度/力) のFRFが含まれます。キャビネットを4個のシェーカーによって加振 (バーストランダム) するMIMOテストが行われました。シェーカー位置はキャビネットが一樣に励起されるように配置し、基礎位置の各サイド (右、左、後方) の向きに設置しました。基礎のレスポンスは29のPCB 352B65加速度センサーによって同時に測定されました。レスポンス位置は、基礎部のおよそ9cm間隔のグリッド上としました。シェーカー位置での力と加速度の測定はPCB 288D01インピーダンスヘッドが使用されました。また、Polytecレーザがキャビネットのサイド・パネルとバック・パネルの位置でレスポンスを測定するために使用されました。すべてのレスポンスはパネル表面に垂直に測定されました。

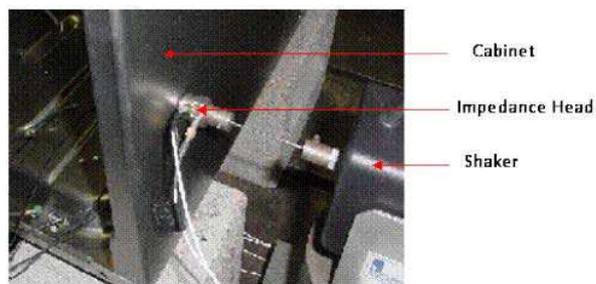
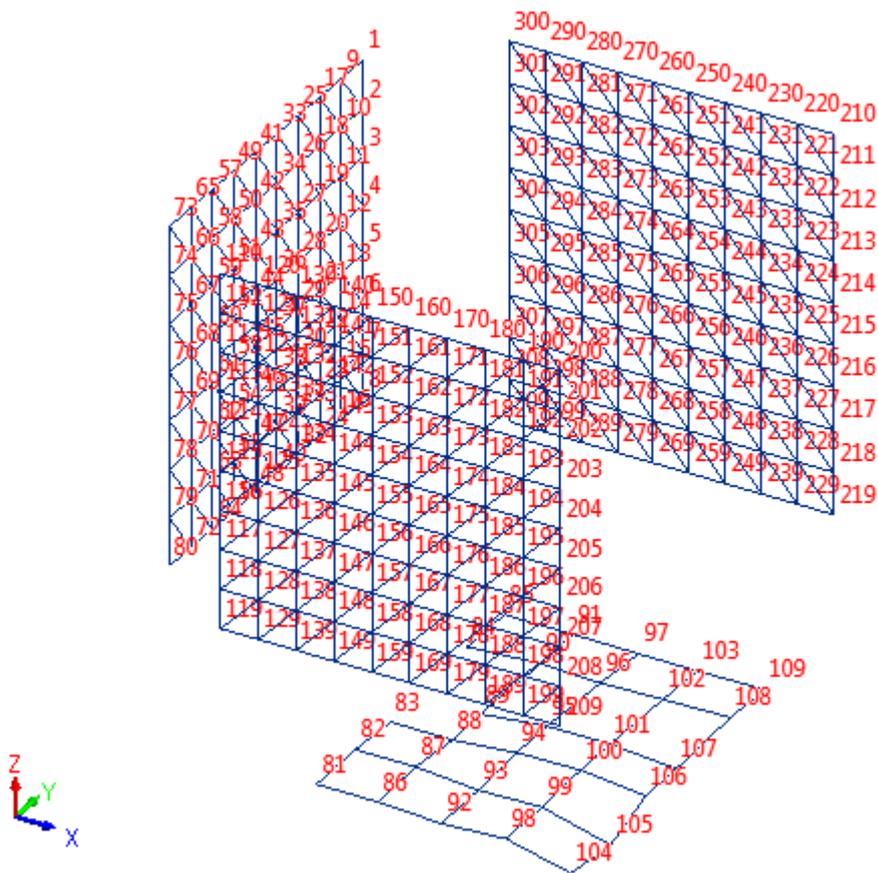


図9 乾燥キャビネットのテスト・セットアップ



## FEMtools MPE ツールボックスのセッティング

次のセッティングがモーダル・パラメータを識別するために使用されました。

Parameter	Value
Maximum order	80
Minimum frequency	1
Maximum frequency	100
Minimum damping ratio [%]	0
Maximum damping ratio [%]	40
Maximum frequency deviation [%]	1
Maximum damping deviation [%]	5
Exponential windowing [%]	No
Fast stabilization	No

表9 FEMtools モーダル・パラメータの識別セッティング

## 推定モード

次のモーダル・パラメータが推定されました。

Mode	Frequency [Hz]	Damping [%]	MPC [%]	MPC [°]	Max MAC
1	14.010	1.11	76.62	44.07	4.97
2	18.656	0.56	83.36	47.43	5.66
3	21.872	1.01	60.14	51.64	7.59
4	24.628	0.41	96.49	41.98	5.66
5	29.792	0.34	97.24	54.16	5.35
6	32.173	0.86	97.80	59.57	10.69
7	34.073	0.94	98.81	60.95	7.22
8	38.476	1.21	94.51	71.94	21.97
9	41.342	1.07	97.91	73.72	21.97
10	45.215	0.24	96.82	62.07	5.16
11	49.254	0.48	93.81	51.30	23.17
12	50.078	0.59	93.96	53.98	53.86
13	53.235	0.39	90.39	43.93	23.17
14	55.242	0.42	98.97	35.15	17.02
15	57.685	0.47	98.29	77.48	16.82
16	59.607	0.63	97.76	69.52	4.60
17	63.816	0.94	83.53	51.13	42.29
18	65.250	0.77	95.39	70.04	23.36
19	67.546	0.39	97.40	70.90	17.30
20	74.143	0.43	98.38	32.41	25.93
21	75.770	0.73	99.02	53.58	29.13
22	77.891	0.26	99.69	72.06	3.08
23	79.490	0.39	98.98	44.78	17.59
24	82.391	0.42	99.29	77.61	20.28
25	82.399	0.52	99.53	65.70	24.26
26	83.848	0.43	99.54	77.46	8.590
27	86.328	0.31	99.47	75.08	12.97
28	89.131	0.19	93.94	51.31	24.98
29	89.165	0.38	98.02	76.73	12.29
30	91.739	0.83	82.31	62.53	45.05
31	91.780	0.29	81.22	58.03	64.90
32	95.402	0.40	98.46	70.38	27.58
33	96.849	0.58	88.07	68.20	22.46

表 10 FEMtools MPE による推定モーダル・パラメータ

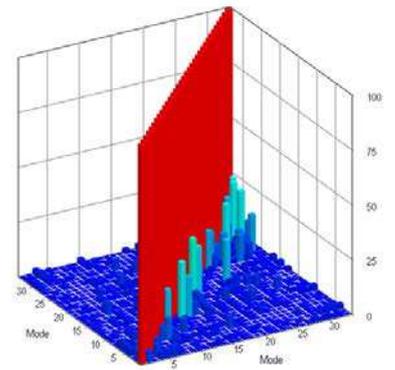
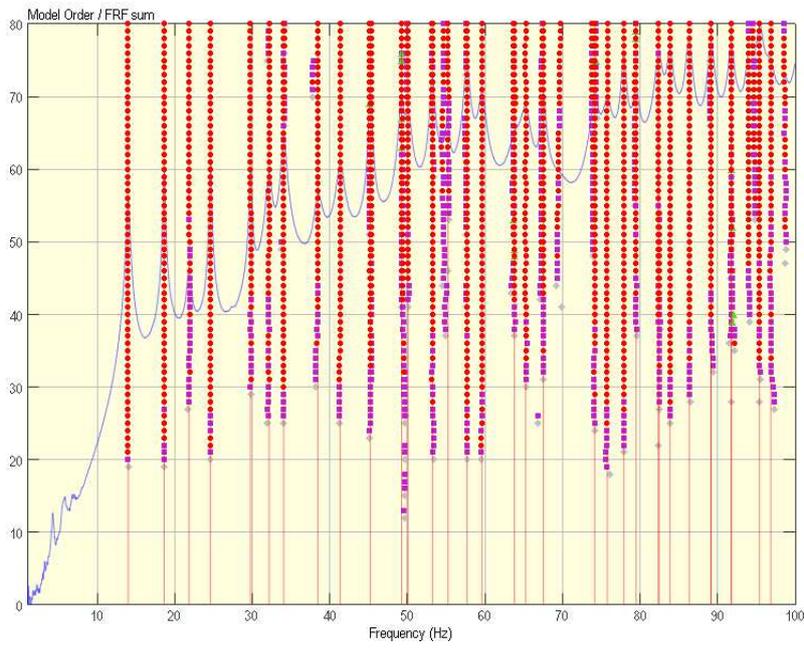


図 10 安定化チャート (左) と推定モード (右) の Auto MAC

## 自動車

### イントロダクション

自動車 (Automobile) データセットは、セダン・タイプ (完成品、タイヤ付き) のモーダル実験から収録されました。設置されたすべての加速度センサーは実験過程にわたって保持 (付けられたままに) され、80% のバーストランダム加振が使用されました。データセットとして、3 つの参照点に対する 398 のレスポンス DOF の FRF とコヒーレンス関数が測定されました。

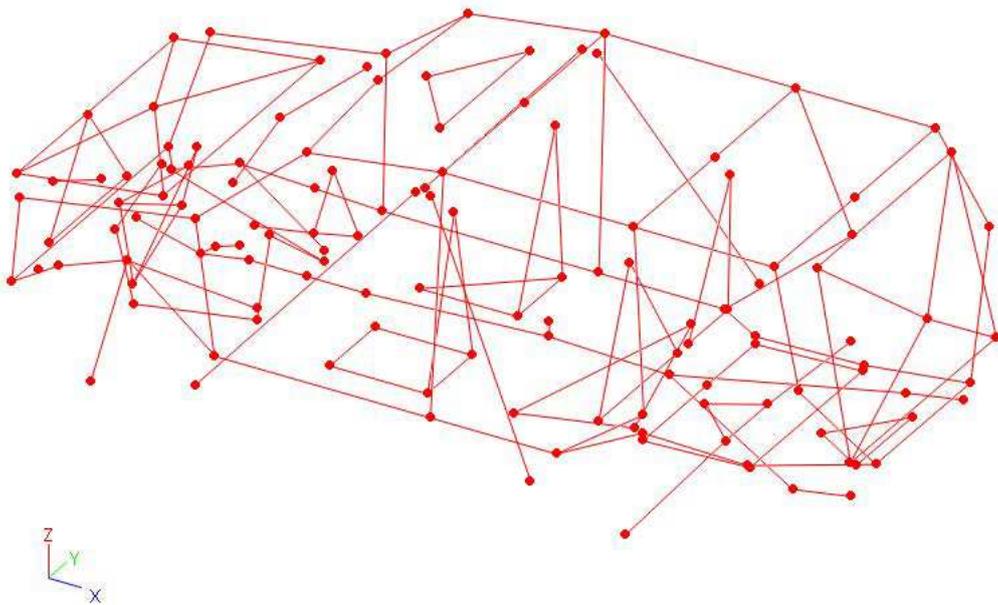


図 11 自動車データセットのテスト・メッシュ

### FEMtools MPE ツールボックスのセッティング

次のセッティングがモーダル・パラメータを識別するために使用されました。

Parameter	Value
Maximum order	80
Minimum frequency	1
Maximum frequency	50
Minimum damping ratio [%]	0
Maximum damping ratio [%]	40
Maximum frequency deviation [%]	1
Maximum damping deviation [%]	5
Exponential windowing [%]	No
Fast stabilization	No

表 11 FEMtools モーダル・パラメータの識別セッティング

## 推定モード

次のモード・パラメータが推定されました。

Mode	Frequency [Hz]	Damping [%]	MPC [%]	MPD [°]	Max MAC
1	2.502	13.61	58.08	46.76	13.32
2	3.260	5.23	77.78	42.07	11.62
3	3.558	3.82	89.28	27.76	17.68
4	4.072	5.88	92.85	29.73	17.68
5	5.917	1.81	99.91	15.28	2.71
6	8.640	5.50	95.10	33.31	8.45
7	9.922	10.56	93.13	40.63	17.99
8	10.330	2.49	98.18	39.60	5.18
9	10.514	9.13	86.49	40.56	32.99
10	11.532	5.30	79.21	41.10	32.99
11	12.053	2.58	91.28	53.81	9.29
12	12.789	1.79	69.85	50.78	11.88
13	13.455	2.22	93.85	32.93	1.94
14	14.123	1.10	98.94	44.25	1.96
15	14.691	1.41	95.53	64.78	2.75
16	15.172	4.17	85.91	34.46	14.31
17	15.967	4.18	61.12	53.36	23.42
18	16.110	1.57	83.13	45.83	23.42
19	16.906	2.12	88.31	43.64	9.67
20	17.468	1.33	89.11	47.97	11.65
21	17.834	2.44	80.68	53.51	16.73
22	18.116	2.02	65.29	58.27	16.73
23	19.351	2.62	85.09	56.50	24.09
24	19.903	1.77	92.35	43.61	24.09
25	21.102	2.07	94.20	49.04	27.49
26	22.213	1.58	75.16	51.31	14.42
27	22.605	3.55	63.33	55.97	14.42
28	23.280	1.49	70.35	50.77	27.49
29	23.927	3.93	62.45	47.94	18.93
30	27.213	1.46	71.88	53.32	28.28
31	27.498	1.46	77.86	42.79	28.28
32	28.020	1.32	63.84	57.23	16.74
33	28.353	0.71	98.72	66.60	4.54
34	29.912	2.55	88.37	36.44	5.87
35	31.663	1.51	58.68	56.94	24.12
36	31.885	2.27	98.40	34.24	12.14

37	32.740	1.81	65.66	51.13	32.19
38	34.246	1.34	60.87	49.27	32.19
39	34.583	2.46	65.08	55.64	40.33
40	35.235	1.57	93.66	50.73	31.52
41	35.990	2.70	71.71	56.11	18.32
42	37.251	2.24	75.16	45.52	40.33
43	37.709	1.31	75.62	51.75	32.00
44	38.029	1.27	72.80	46.00	32.00
45	38.657	1.85	65.70	52.13	20.55
46	40.414	2.12	68.29	51.94	11.17
47	42.411	2.44	72.99	41.17	15.61
48	42.974	1.16	98.57	46.64	10.63
49	43.137	2.23	69.39	45.38	15.61
50	44.703	1.49	66.39	48.11	30.22
51	46.787	2.07	72.62	50.27	30.22
52	47.641	1.57	63.58	46.07	16.48

表 12 FEMtools MPE による推定モーダル・パラメータ

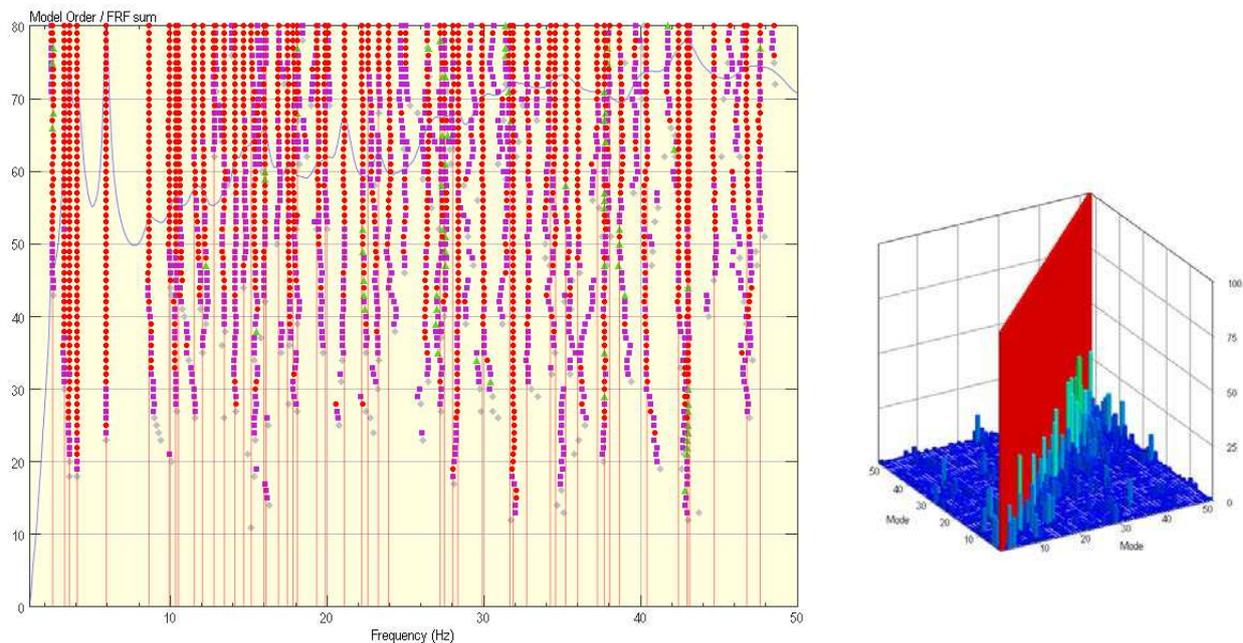


図 12 安定化チャート (左) と推定モード (右) の Auto MAC

## 航空宇宙衛星

### イントロダクション

航空宇宙衛星（RADARSAT-I）データセットは、その基礎において 260 ポンドのアンカーがマウントされた構造での実験モーダル解析から収録されました。設置されたすべての加速度センサーは実験過程にわたって保持（付けられたままに）され、80%のバーストランダム加振が使用されました。データセットとして、5つの参照点に対する 240 のレスポンス DOF の FRF が測定されました。テスト構造物は、ローカルモードを持ついくつかのパネルで構成されているため、コヒーレンス関数の測定は必要としません。

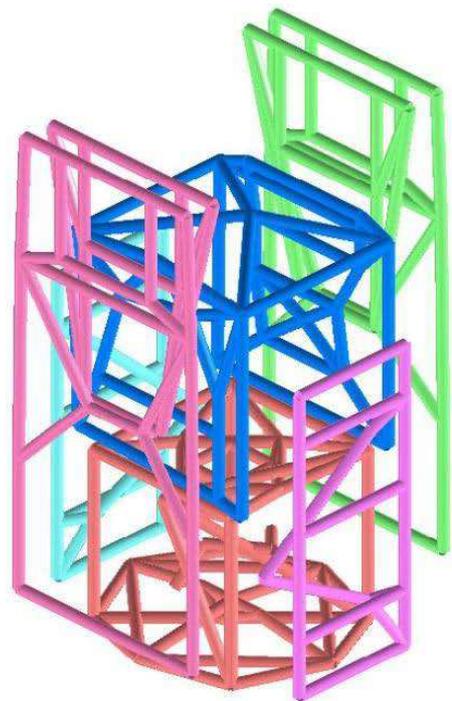


図 13 RADARSAT-I のテスト・セットアップ（左）と測定グリッド（右）

## FEMtools MPE ツールボックスのセッティング

次のセッティングはモーダル・パラメータを FEMtools MPE と同一視するために使用されました。

Parameter	Value
Maximum order	80
Minimum frequency	0.1
Maximum frequency	90
Minimum damping ratio [%]	0
Maximum damping ratio [%]	40
Maximum frequency deviation [%]	1
Maximum damping deviation [%]	5
Exponential windowing [%]	No
Fast stabilization	No

表 13 FEMtools モーダル・パラメータの識別セッティング

## 推定モード

次のモーダル・パラメータが推定されました。

Mode	Frequency Hz]	Damping [%]	MPC [%]	MPD [°]	Max MAC
1	15.618	0.16	99.54	6.88	47.24
2	16.852	0.13	99.75	36.75	12.05
3	29.017	0.15	99.81	15.64	8.60
4	32.386	0.12	98.32	53.14	33.99
5	33.001	0.17	99.42	37.81	35.42
6	33.115	0.07	96.87	46.42	39.08
7	33.826	0.13	99.90	3.85	52.21
8	37.350	0.10	99.76	30.89	50.88
9	38.041	0.12	99.88	21.26	36.76
10	39.960	0.16	99.96	10.49	20.32
11	44.757	0.19	99.96	14.71	11.27
12	46.029	0.21	99.92	21.51	11.99
13	46.911	0.11	99.96	18.81	1.89
14	47.619	0.13	99.88	12.43	10.12
15	49.061	0.16	99.45	12.48	52.21
16	49.298	0.25	99.87	28.94	12.74
17	49.795	0.20	99.85	28.36	29.52
18	50.020	0.13	99.61	34.73	39.08
19	50.449	0.14	99.82	18.20	36.76
20	50.720	0.11	99.63	23.03	50.88
21	51.063	0.25	99.75	19.11	29.52

22	51.401	0.23	99.66	25.26	36.83
23	51.884	0.28	99.74	15.69	23.76
24	52.146	0.23	99.90	14.18	36.83
25	53.797	0.25	99.83	10.80	15.96
26	54.274	0.23	99.88	11.13	30.04
27	55.963	0.22	99.97	13.90	40.24
28	57.013	0.31	99.81	17.71	30.04
29	57.217	0.28	99.85	15.42	40.24
30	57.805	0.20	99.97	14.23	28.97
31	59.804	0.31	99.69	20.33	11.12
32	61.090	0.25	99.95	6.89	12.45
33	66.475	0.29	99.90	12.79	31.28
34	67.261	0.23	99.95	13.71	7.51
35	68.128	0.31	99.57	13.36	70.08
36	68.684	0.36	99.04	17.78	70.08
37	69.889	0.35	99.24	13.34	28.57
38	70.331	0.38	99.44	19.45	23.42
39	72.627	0.35	95.57	33.20	25.82
40	72.830	0.36	97.01	26.38	24.39
41	73.720	0.33	98.44	26.57	29.67
42	75.391	0.36	99.28	19.20	29.67
43	76.297	0.85	92.82	36.07	44.32
44	77.551	0.31	99.17	24.90	39.77
45	77.582	0.64	98.49	26.15	20.47
46	78.405	0.28	97.76	20.45	17.42
47	79.397	0.17	97.57	23.38	21.30
48	79.424	0.22	97.81	38.15	44.32
49	80.451	0.28	91.43	24.69	27.29
50	80.589	0.52	96.15	40.17	23.42
51	80.835	0.34	97.23	26.78	27.29
52	81.369	0.35	98.56	21.39	28.57
53	82.664	0.18	96.13	31.77	38.97
54	82.738	0.32	95.66	36.54	19.44
55	84.136	0.21	97.63	29.82	24.39
56	84.445	0.16	98.20	28.09	22.12
57	86.077	0.35	96.29	26.98	28.39
58	86.572	0.19	91.21	61.72	8.37

表 14 FEMtools MPE による推定モデル・パラメータ

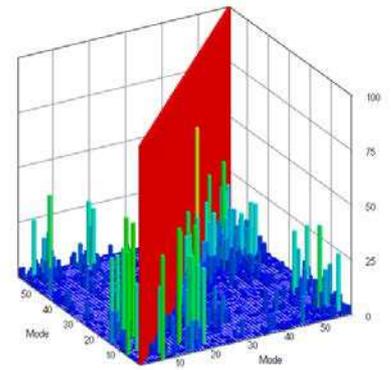
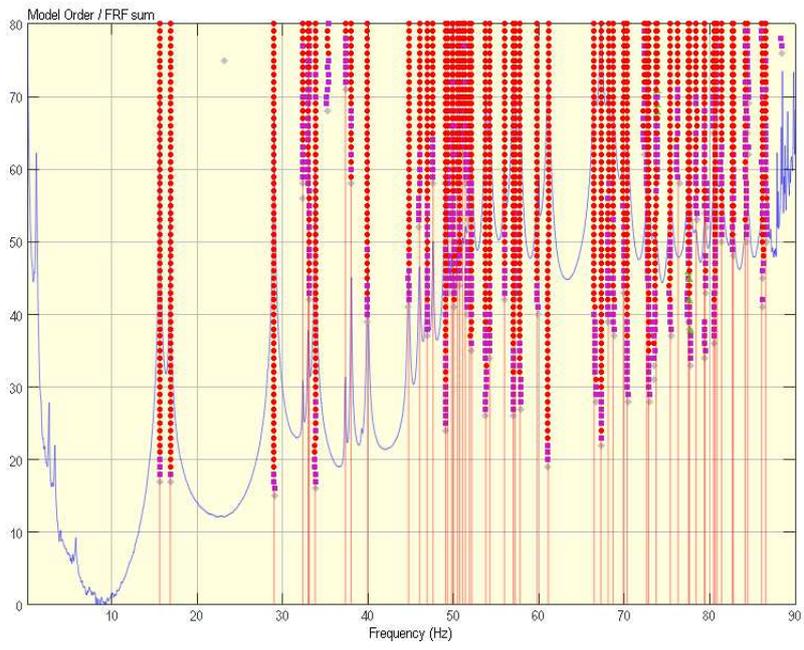


図 14 安定化チャート (左) と推定モード (右) の Auto MAC