

**IMAC XXIX Round Robin
Operational Modal Analysis
実稼働モーダル解析**

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) に関する実稼働モーダル解析 (OMA) のフレームワークを示します。

例証1 — 一般モード系

イントロダクション

次の解析的データセットは、単純な 5 つの自由度系データとして生成されました。それらのデータはすべての 5 つの DOF でのランダム加振によって生成されました。そのサンプリングレートは、256Hz であり、次のような質量 (Mass)、剛性 (Stiffness)、減衰 (Damping) のマトリックスで示されます。

$$M = 2.5 \times \begin{bmatrix} 100 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 140 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 12 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 180 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 20 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$K = 10^6 \times \begin{bmatrix} 9 & -5 & 0 & 0 & 0 \\ -5 & 11 & -6 & 0 & 0 \\ 0 & -6 & 12.5 & -6.5 & 0 \\ 0 & 0 & -6.5 & 14.5 & -8 \\ 0 & 0 & 0 & -8 & 15 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$C = 10^{-2} \times \begin{bmatrix} 325 & -25 & 0 & 0 & 0 \\ -25 & 45 & -20 & 0 & 0 \\ 0 & -20 & 32 & -12 & 0 \\ 0 & 0 & -12 & 19 & -7 \\ 0 & 0 & 0 & -7 & 27 \end{bmatrix} \quad (3)$$

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	0.015
Maximum frequency	128
Minimum damping ratio [%]	0
Maximum damping ratio [%]	10
Maximum frequency deviation [%]	1
Maximum damping deviation [%]	5
Exponential windowing [%]	0

表 1 モーダル・パラメータ識別セッティング

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	12.534	1.19	99.69	6.76	23.43
2	22.088	1.09	99.93	2.52	8.98
3	34.849	2.12	98.23	31.71	5.39
4	88.518	0.50	100.00	0.22	8.98
5	104.807	0.85	99.99	1.66	23.43

表 2 FEMtools MPE による推定モーダル・パラメータ

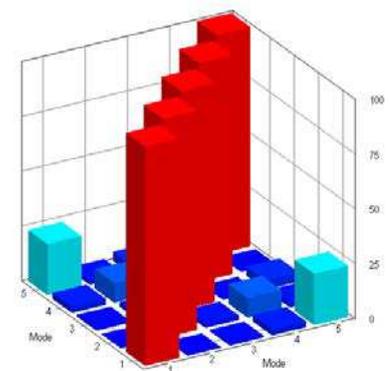
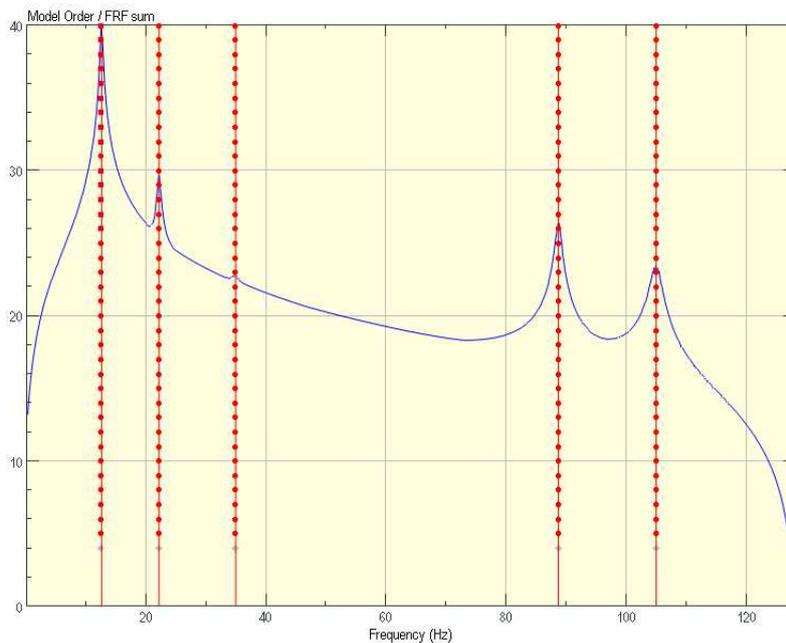


図 1 安定化チャート(左)と推定モードの Auto MAC(右)

比較

図 2 は、IMAC XXIX 参加システムによる結果の比較を示します。

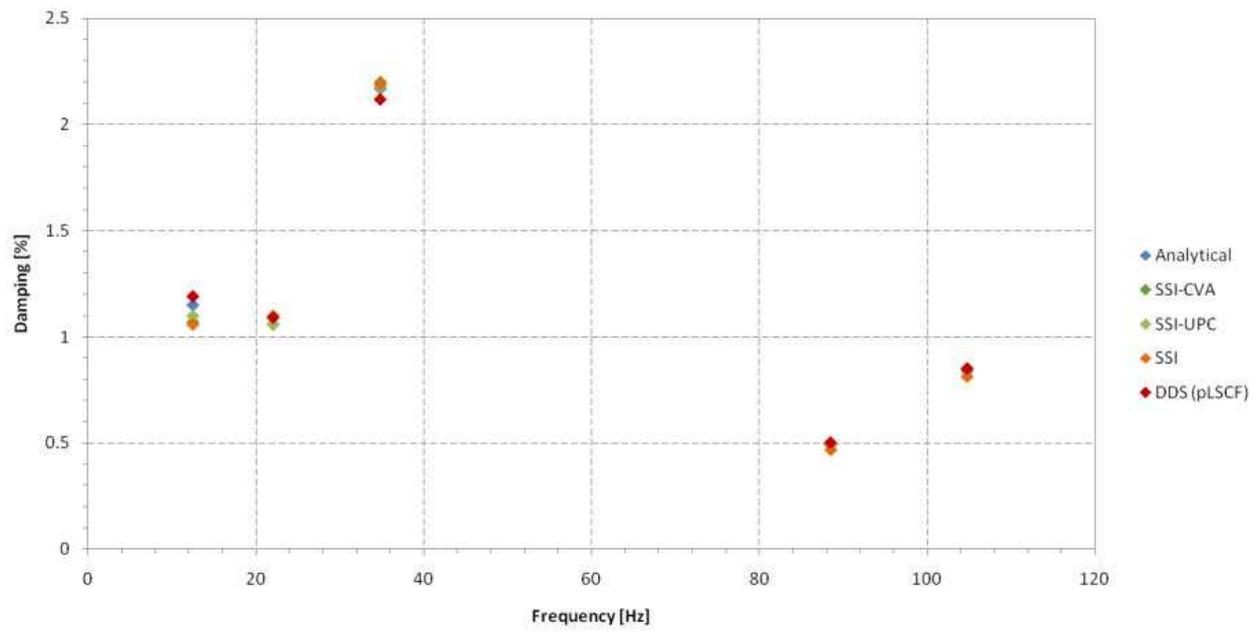


図 2 IMAC 参加システムの結果比較

例証2 — 微小減衰モード系

イントロダクション

次の解析的データセットは、単純な 5 つの自由度系データとして生成されました。それらのデータはすべての 5 つの DOF でのランダム加振によって生成されました。そのサンプリングレートは、256Hz であり、次のような質量 (Mass)、剛性 (Stiffness)、減衰 (Damping) のマトリックスで示されます。

$$M = 2.5 \times \begin{bmatrix} 100 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 140 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 12 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 180 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 20 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$K = 10^6 \times \begin{bmatrix} 9 & -5 & 0 & 0 & 0 \\ -5 & 11 & -6 & 0 & 0 \\ 0 & -6 & 12.5 & -6.5 & 0 \\ 0 & 0 & -6.5 & 14.5 & -8 \\ 0 & 0 & 0 & -8 & 15 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$C = 10^{-2} \times \begin{bmatrix} 120 & -5 & 0 & 0 & 0 \\ -5 & 25 & -10 & 0 & 0 \\ 0 & -10 & 15 & -20 & 0 \\ 0 & 0 & -20 & 10 & -25 \\ 0 & 0 & 0 & -25 & 7 \end{bmatrix} \quad (6)$$

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	0.015
Maximum frequency	128
Minimum damping ratio [%]	0
Maximum damping ratio [%]	10
Maximum frequency deviation [%]	1
Maximum damping deviation [%]	5
Exponential windowing [%]	0
Fast stabilization	No
Reference channels	1, 3, 5
XPS blocksize	102400

表 3 モーダル・パラメータ識別セッティング

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	12.524	0.02	100.00	0.02	23.57
2	22.080	0.01	100.00	0.01	9.18
3	34.887	0.10	100.00	0.10	3.39
4	88.525	0.00	100.00	0.00	9.18
5	104.783	0.00	100.00	0.00	23.57

表 4 FEMtools MPE による推定モーダル・パラメータ

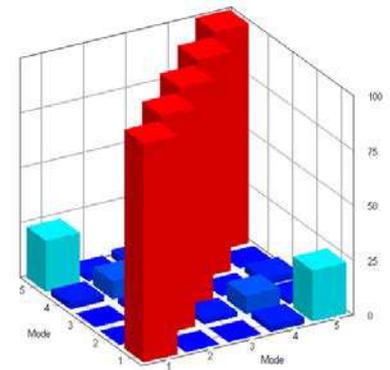
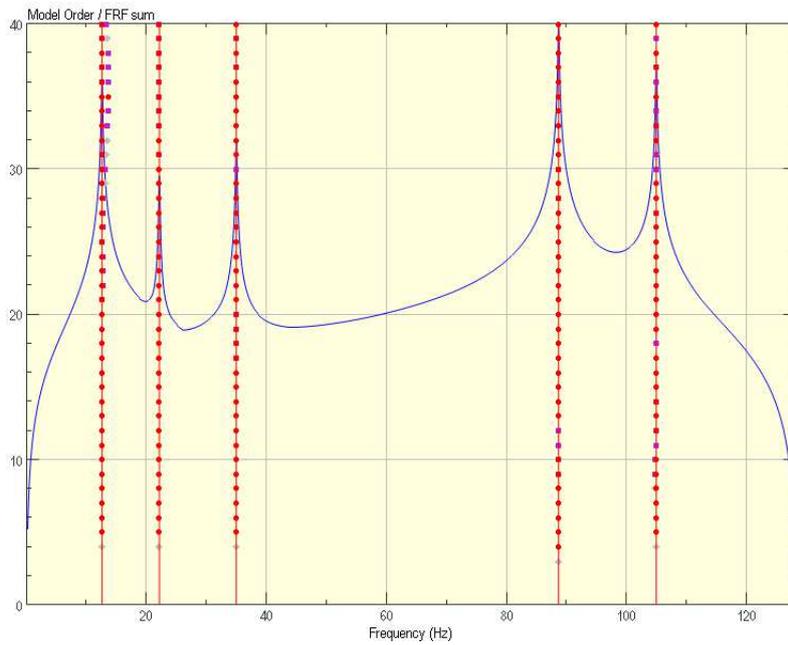


図3 安定化チャート(左)と推定モードの Auto MAC(右)

比較

図4は、IMAC XXIX 参加システムによる結果の比較を示します。

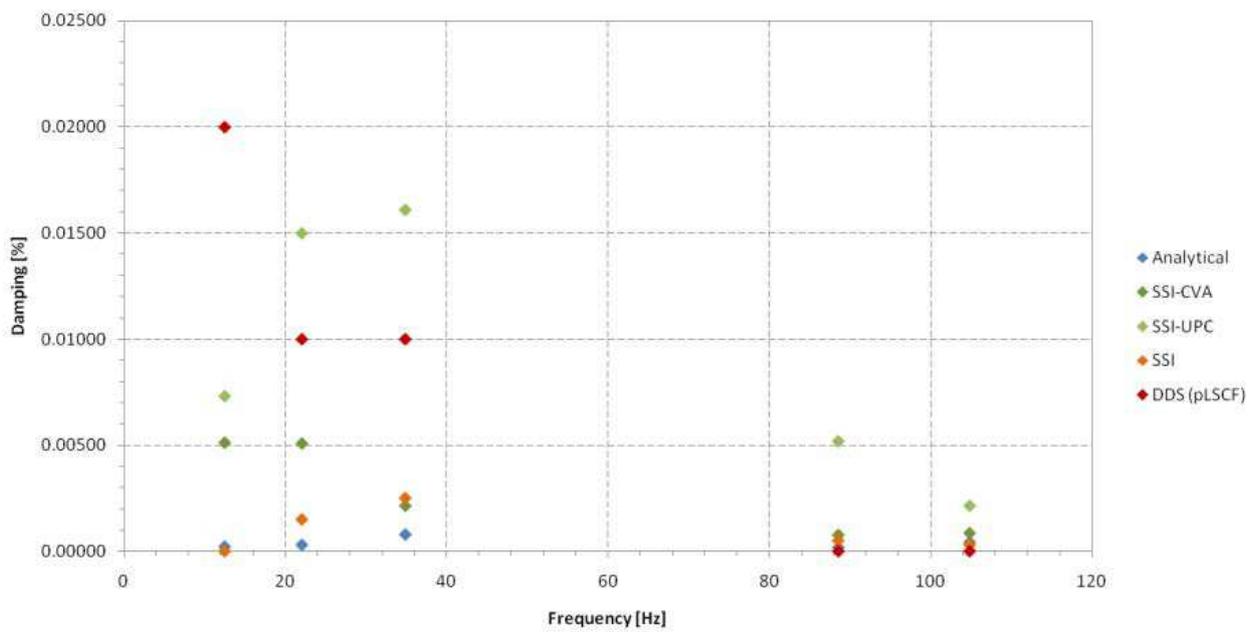


図4 IMAC 参加システムの結果比較

例証3 – 比例減衰モード系

イントロダクション

次の解析的データセットは、単純な 5 つの自由度系データとして生成されました。それらのデータはすべての 5 つの DOF でのランダム加振によって生成されました。そのサンプリングレートは、256Hz であり、次のような質量 (Mass)、剛性 (Stiffness)、減衰 (Damping) のマトリックスで示されます。

$$M = 2.5 \times \begin{bmatrix} 100 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 140 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 12 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 180 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 20 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$K = 10^6 \times \begin{bmatrix} 9 & -5 & 0 & 0 & 0 \\ -5 & 11 & -6 & 0 & 0 \\ 0 & -6 & 12.5 & -6.5 & 0 \\ 0 & 0 & -6.5 & 14.5 & -8 \\ 0 & 0 & 0 & -8 & 15 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$C = 1.3M + 0.0004K \quad (9)$$

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	0.015
Maximum frequency	128
Minimum damping ratio [%]	0
Maximum damping ratio [%]	10
Maximum frequency deviation [%]	1
Maximum damping deviation [%]	5
Exponential windowing [%]	0
Fast stabilization	No
Reference channels	1, 3, 5
XPS blocksize	16384

表 5 モーダル・パラメータ識別セッティング

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	12.505	2.51	100.00	0.89	92.96
2	22.065	3.11	100.00	0.12	3.85
3	34.873	4.59	100.0	1.61	5.19
4	88.166	9.00	97.53	28.36	52.96
5	103.907	9.27	70.79	49.00	92.96

表 6 FEMtools MPE による推定モーダル・パラメータ

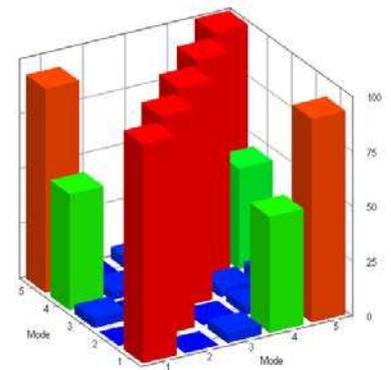
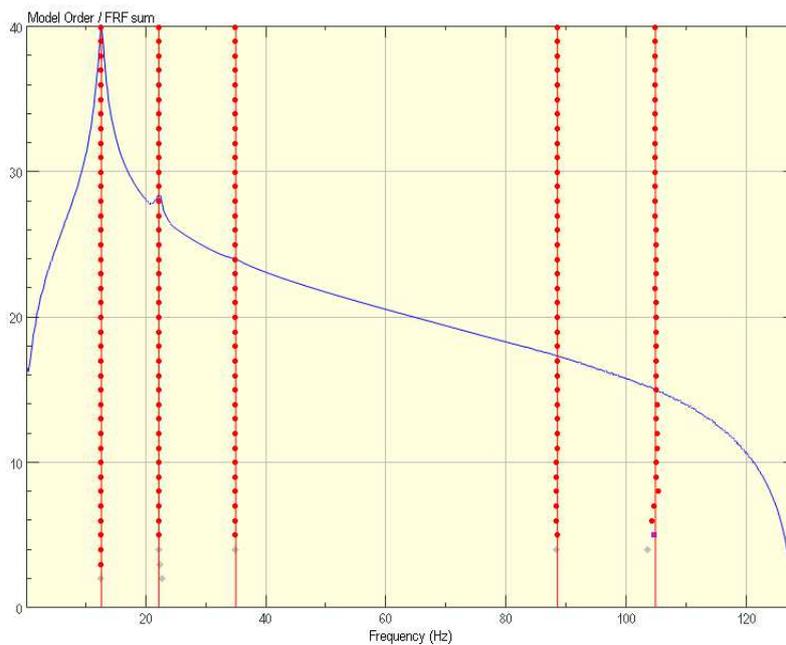


図 5 安定化チャート(左)と推定モードの Auto MAC(右)

比較

図 6 は、IMAC XXIX 参加システムによる結果の比較を示します。

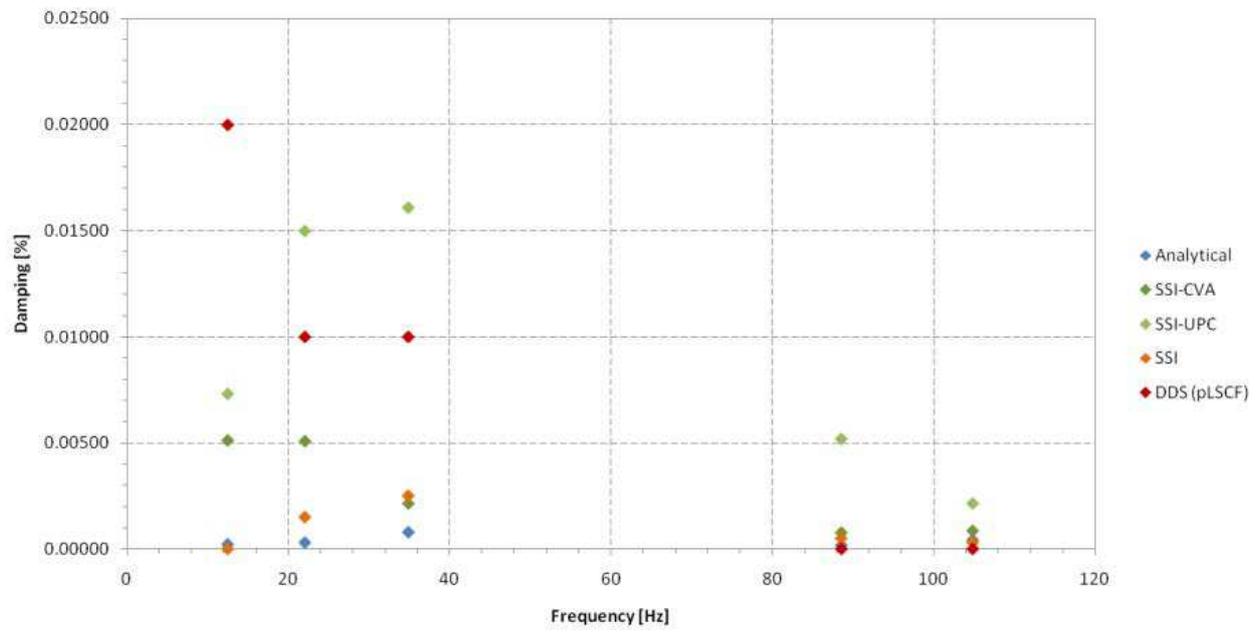


図 6 IMAC 参加システムの結果比較

風力タービン翼

イントロダクション

風力タービン翼（Wind Turbine Blade）モデルは、構造特性を実験 OMA 技術によって評価するために行われました。構造物は根元が拘束され、約 5 分間、ランダム加振によって励振されました。サンプル周波数レンジは 512Hz ですが、解析対象周波数レンジは 200Hz 以内です。レスポンスは、16 のすべて位置で 3 方向が測定されました。



図 7 風力タービン翼モデル

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	60
Minimum frequency	0.2
Maximum frequency	200
Minimum damping ratio [%]	0
Maximum damping ratio [%]	10
Maximum frequency deviation [%]	1
Maximum damping deviation [%]	5
Exponential windowing [%]	0
Fast stabilization	No
Reference channels	1, 6, 13
XPS blocksize	3072

表 7 モーダル・パラメータ識別セッティング

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	7.26	4.43	97.77	52.65	39.52
2	7.61	5.62	92.92	34.54	39.52
3	9.91	5.13	98.49	34.54	39.52
4	27.20	2.00	99.96	2.84	82.45
5	44.79	1.36	99.95	52.13	28.83
6	49.78	1.74	99.97	6.43	63.15
7	59.39	1.26	99.49	39.65	47.61
8	63.96	1.66	99.75	5.62	72.32
9	71.73	0.82	97.98	29.50	80.79
10	73.25	0.93	93.12	29.72	80.79
11	77.27	1.06	99.92	20.22	52.29
12	86.50	1.43	97.60	40.70	27.77
13	93.37	1.00	99.01	41.73	52.29
14	93.68	1.04	93.79	46.71	23.54
15	103.50	1.23	96.30	34.48	32.58
16	106.58	0.94	64.68	46.53	57.12
17	107.63	0.86	90.75	43.03	31.02
18	112.83	0.29	80.60	50.70	75.40
19	117.66	0.89	90.36	54.35	30.83
20	125.26	1.11	80.13	57.73	61.08
21	128.80	0.92	96.94	22.95	87.54
22	136.84	0.77	92.69	34.33	93.61
23	141.76	0.94	86.01	41.97	91.12
24	145.35	0.77	96.14	24.49	77.56
25	150.35	0.78	86.58	61.42	91.12

表 8 FEMtools MPE による推定モーダル・パラメータ

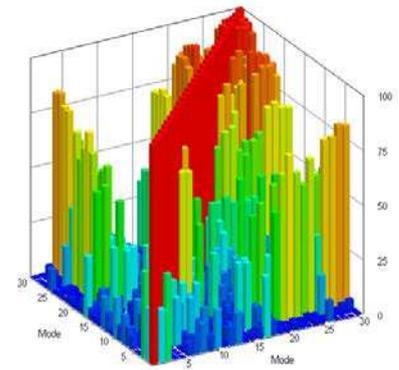
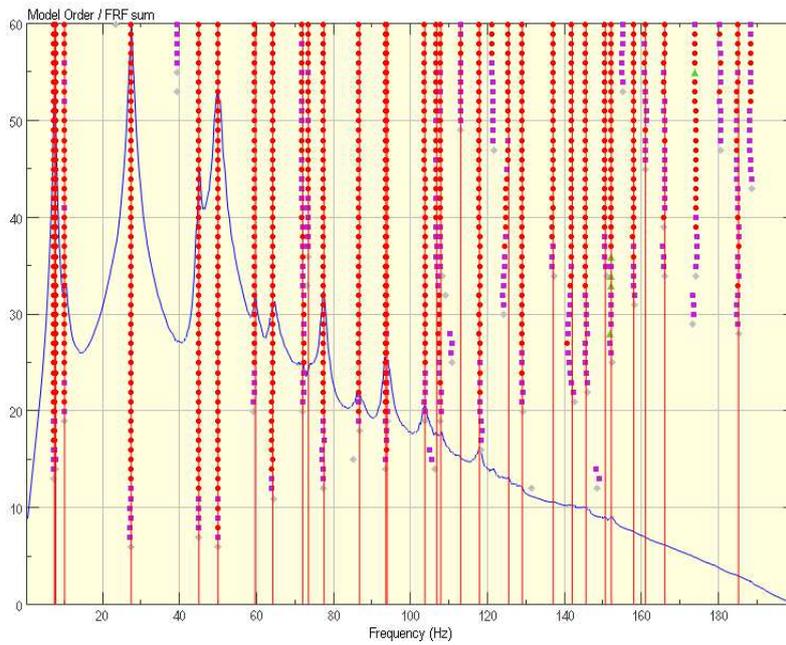


図8 安定化チャート(左)と推定モードの Auto MAC(右)

最初のモード 1(7.26Hz)とモード 2(7.61Hz)は近接した2つのモードです。第1のモードは、主として横断方向の構造モードであり、第2のモードは主として面内方向の構造モードです。モード 13 と 14 も近接したモードです。

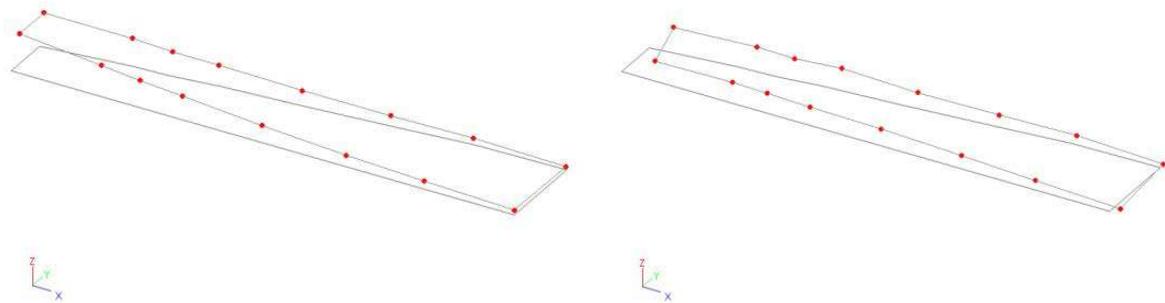


図9 最初の近接モード：モード 1(左)とモード 2(右)

比較

図 10 は、IMAC XXIX 参加システムによる結果の比較を示します。

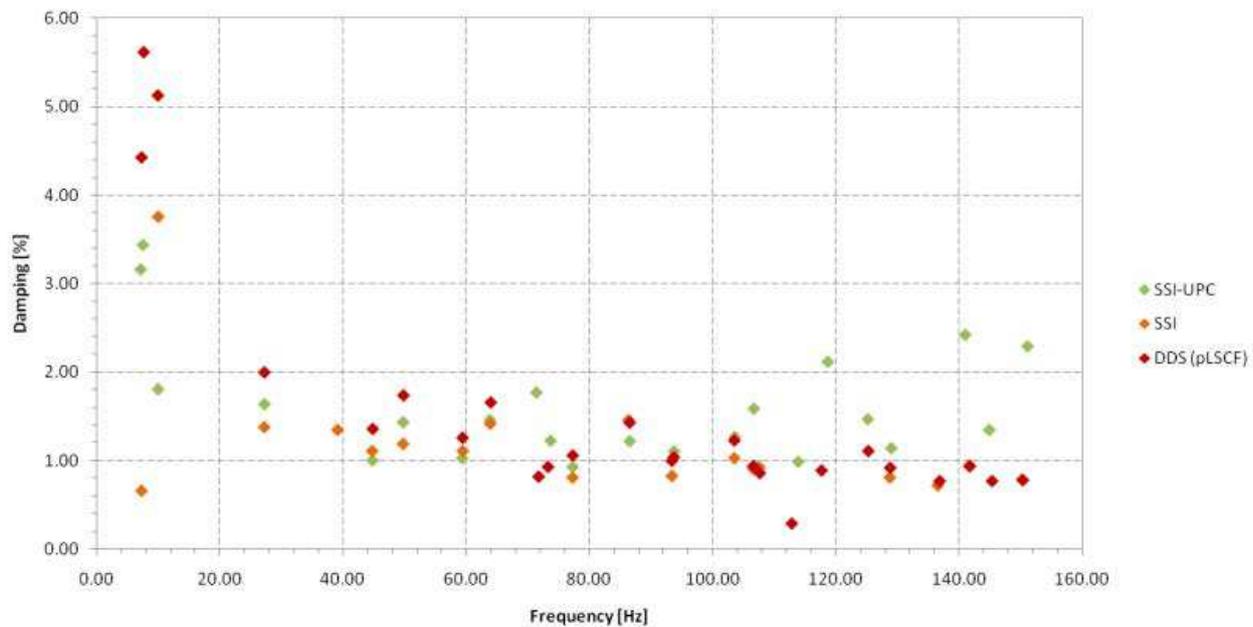


図 10 IMAC 参加システムの結果比較

船

イントロダクション

船体データセットは、プロペラの回転オン時と回転オフ時において収録されました。実験中のエンジンは、123rpm で作動し、90 分間にわたってデータが測定され、そのサンプリング周波数は 128Hz、対象周波数レンジは 0-10Hz です。船は制御可能ピッチの片翼備えた 4 本のプロペラを持っています。



図 11 試験済みの回転オン回転オフ船。

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	0.2
Maximum frequency	10
Minimum damping ratio [%]	0
Maximum damping ratio [%]	10
Maximum frequency deviation [%]	1
Maximum damping deviation [%]	5
Exponential windowing [%]	No
Fast stabilization	No
Reference channels	1, 2
XPS blocksize	16384

表 10 モーダル・パラメータ識別セッティング

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	1.34	1.72	99.42	4.27	21.98
2	2.02	1.08	99.87	35.66	96.31
3	2.05	0.07	99.43	37.32	96.31
4	2.29	0.94	96.11	27.24	74.55
5	2.95	1.49	99.45	28.23	50.19
6	3.29	1.35	98.71	57.96	69.27
7	3.37	0.36	98.08	12.42	69.27
8	3.44	1.19	89.73	45.64	48.05
9	3.80	1.00	80.95	38.82	44.22
10	3.96	0.58	97.39	30.99	61.24
11	4.10	0.04	92.08	50.72	85.00
12	4.28	0.73	94.48	34.26	85.00
13	4.51	0.88	99.62	24.55	61.24
14	5.02	1.43	91.59	30.10	31.89
15	5.10	0.70	77.84	41.57	28.34
16	5.29	0.68	66.65	54.63	18.73
17	5.88	0.79	92.35	48.92	51.78
18	6.88	0.60	77.29	58.66	52.79
19	8.20	0.05	96.93	18.14	96.40

表 11 FEMtools MPE による推定モード・パラメータ

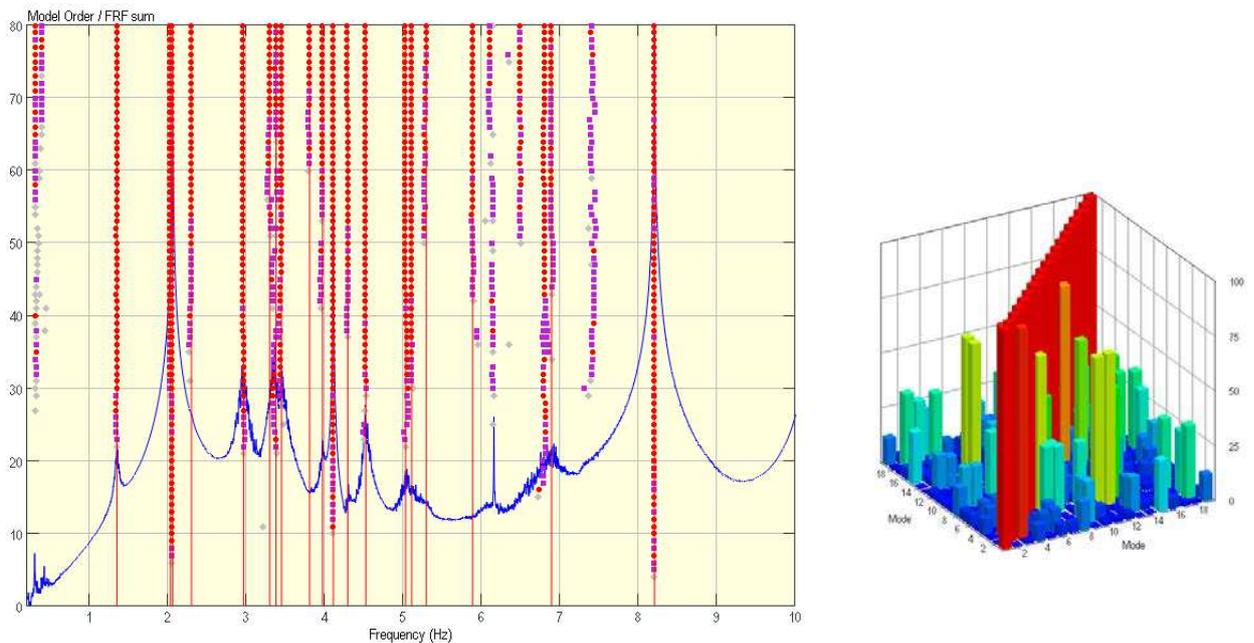
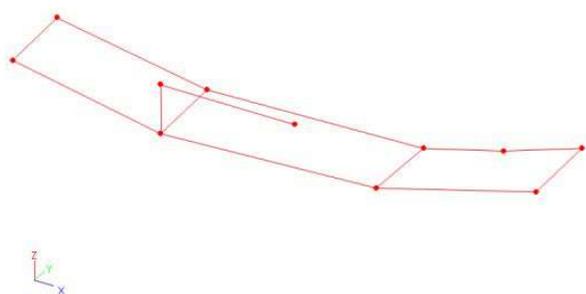
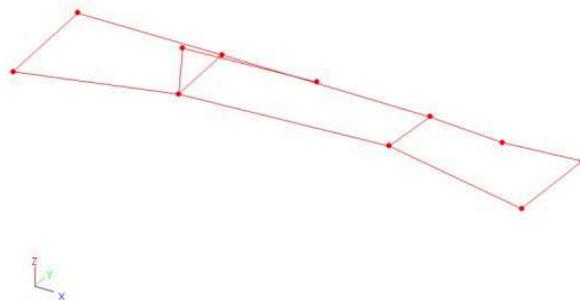


図 12 安定化チャート(左)と推定モードの Auto MAC(右)

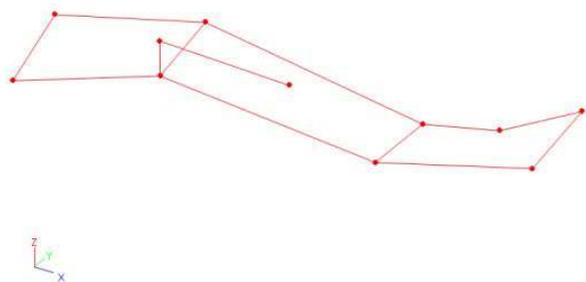
以下に識別された最初の 4 つの低次モードを示します。船体の左側（5 ポイントを備えたライン）のポイントは Z 方向のみが測定されたことに注意してください。これはモード 2 のプロット上でこの左側に変形が見られないことから確認できます。



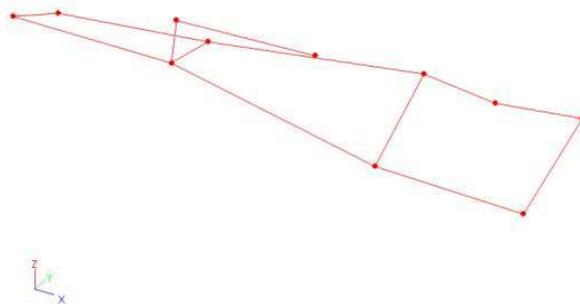
モード 1:面外曲げ 1 次モード



モード 2: 面内曲げ 1 次モード



モード 3: 面外曲げ 2 次モード



モード-4:ねじれ 1 次モード

図 13 低次の 4 つのモードシェープ

比較

図 14 は、IMAC XXIX の参加システムによって得られた結果比較を示します。

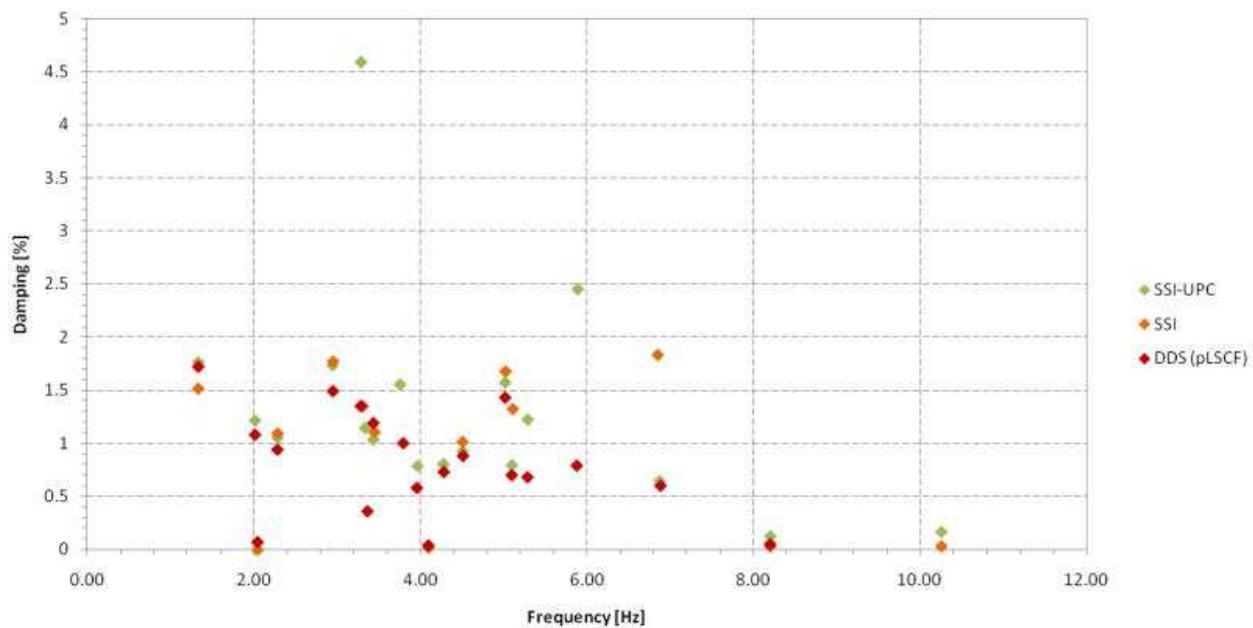


図 14 IMAC 参加システムの結果比較