

# 九州連携CAE研究会における共通課題の解析と実験による検証

—構造物の周波数応答と熱応力解析に関する調査—

清水慎吾\*・宮城友昭\*・橋口智和\*\*

\*金属担当・\*\*機械担当

## Verification and experiment of the CAE example in CAE study group of Kyushu

—Research of thermal stress and frequency response of structure—

Shingo SHIMIZU\*・Tomoaki MIYAGI\*・Tomokazu HASHIGUCHI\*\*

\*Metallurgy Section・\*\*Machinery Section

### 要 旨

「九州連携CAE研究会」の下、共通解析課題「構造物の周波数応答」と「熱応力解析」を共通課題として解析を行った。「構造物の周波数応答」においては、拘束フリーの構造物における固有値と、一定の加速度を所定の周波数範囲で与える振動試験時の変形について、解析と実験の比較を行った。その結果モーダル解析では、測定された実験値と解析値は近い値となることが確認された。また振動試験時の構造物の変形量は、モデルの減衰を考慮することで、大きな変形を生じるポイントでは高速度カメラによる測定値に近い傾向の解析値が得られた。「熱応力解析」については、時刻歴解析では、定常伝熱における最大主応力を大きく上回る最大主応力が生じることが確認された。

### 1. はじめに

CAEとは「Computer aided engineering」の略称であり、コンピュータ上で構造物に対する荷重や熱といった諸現象の影響をシミュレーションする技術やそのツールを指す。近年のものづくりにおいて、CAE解析はコスト削減などの目的から、製品設計や品質管理に欠かせない技術として確立されている。九州・沖縄及び周辺の各県公設試では、九州地方知事会の下「九州連携CAE研究会」として、これまでに構造・伝熱・流体・固有値等の様々な解析課題について各公設試の有するCAE解析ソフトによる解析を実施し、その結果の比較検討を行ってきた。本テーマでは構造物の周波数応答解析について解析と実験による検証を行った。また、構造物の熱応力解析についての調査を行った。

### 2. 構造物の周波数応答解析

構造物の設計では静的荷重に対する耐荷重性のみならず、周波数応答や固有値といった振動に関する評価も重要である。機械部品においては騒音や疲労破壊、建築物や設置機器のような構造物については共振による過大な応力の発生など、振動は様々な問題の要因となりうるからである。国内でも近年頻発する震災の影響により、耐震性について大きく注目されるようになり、これまで耐震性能に関する評価を行ってこなかった製品が評価を要求されたり、

従来基準以上の耐震性を求められたりするケースがある。今後もその傾向は続くことが予想されるが、製品の耐震性を実験で評価するには大掛かりな試験機が必要であり、また一品ものであっても販売する製品とは別に実験用の製品を準備する必要がある等、企業にとって大きなコスト負担を求められている。そのため設計段階における、事前の耐震性評価がニーズとして存在する。センターでは所有するCAEソフト「ANSYS」を用いることで、構造物の固有値と変形形状を算出する「モーダル解析」に加え、実際に所定の周波数で境界条件を与えた場合の応力・変位等の値を求める「周波数応答解析」を行うことが可能である。それらの信頼性を向上させ、振動設計の事前評価体制を構築することは県内企業への支援に有効である。今回はそのモーダル解析と周波数応答解析について、実験と合わせた解析による評価を行った。

#### 2.1 モーダル解析

##### 2.1.1 解析と実験の条件

解析モデルを Fig.1 に示す。解析モデルは 600×800 mm の板材(厚さ 4.5mm)2枚を、L字アングル材(50 mm×50 mm×5 mm)4本で高さ 300, 600mm に固定した架台状で、アングルは底部で 850×850 mmの板(厚さ 6 mm)に固定されている。また2枚目の板中央には 100mm 立方のブロックを載せている。なお材料物性値については鋼材を想定し、

Table1 に示すとおり架台とブロックともにヤング率 205GPa, ポアソン比 0.29, 密度 7.85g/cm<sup>3</sup>とした。

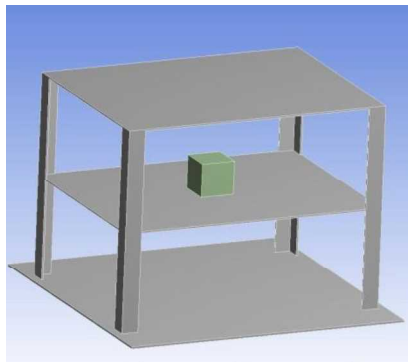


Fig.1 モーダル解析モデル

Table 1 モーダル解析材料物性値

ヤング率【GPa】	205
ポアソン比	0.29
密度【g/cm <sup>3</sup> 】	7.85

このモデルに対し拘束フリー設定でのモーダル解析を行い, モード次数 15 までの固有値とそのモード形状を求めた. 今回の解析について, 各公設試で使用した CAE システムを Table 2 に示す.

Table 2 各県の解析ソフト

機関	解析ソフト
大分	ANSYS Ver 17
山口	Marc 2003
福岡	SolidWorks Simulation 2016
長崎	SolidWorks Simulation 2015
沖縄	ANSYS Ver 17.1
島根	ANSYS Ver 17
鳥取	ANSYS Ver 17

また, 実際にモデルと同形状のサンプルを作成し, 天井から吊り下げた状態で加速度センサを取り付け, 加振用ハンマによる打撃試験で固有値計測を行った. 計測ロガーはリオン社 SA-02A4 を用いた. Fig.2 にその様子を示す.

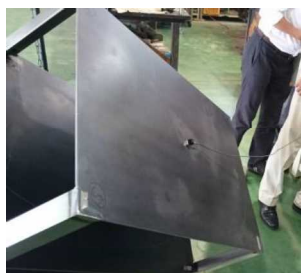


Fig.2 固有値計測実験の様子

## 2.1.2 解析と実験の結果

大分県のモーダル解析結果のモード形状を Fig.3 に示す. なお, ANSYS での拘束フリー設定におけるモーダル解析では, モード 1 から 6 においては剛体モードとなり, 7 が実質 1 次モードとなる.

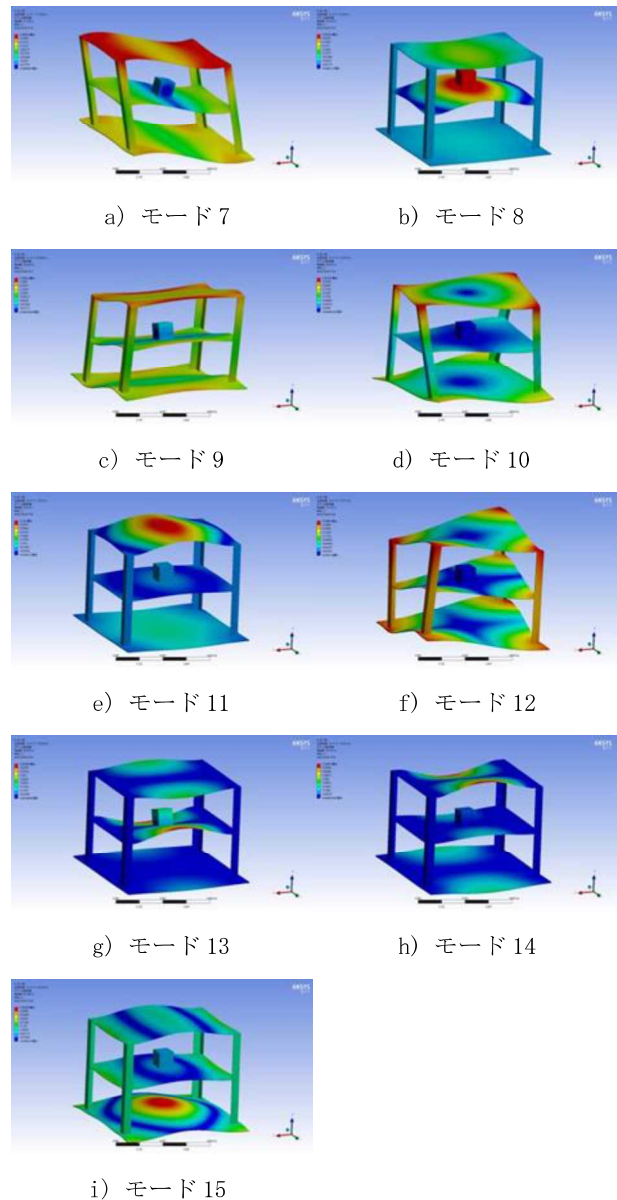


Fig.3 モード形状 (大分県)

次いで Table 3 に各県のモーダル解析の結果を, Fig.4 にそのグラフを示す. 各県ともに各次数における周波数は近い値となったが, 山口県のみが異なった傾向を示した. 山口県の解析システム「Marc」ではモデルを完全に拘束フリーとする設定が行えないため, 剛性の低い節点を設けてモデルをリンクさせ, 疑似的な拘束フリーとして解析を試行した影響があると思われる.

Table 3 各県のモーダル解析結果 (Hz)

次数	大分	山口	福岡	長崎	沖縄	鳥取	島根
7	21.71	24.48	22.09	21.46	23.08	21.86	21.45
8	23.26	27.40	23.76	22.50	24.02	23.52	22.33
9	25.77	30.07	26.41	25.34	27.58	26.10	25.29
10	26.62	31.74	27.14	26.84	28.26	26.81	26.30
11	32.04	34.95	32.84	31.17	33.60	31.96	31.38
12	37.71	35.56	38.46	36.96	39.36	38.01	37.23
13	50.63	38.42	51.42	49.76	52.01	51.11	49.41
14	55.44	39.11	56.88	54.70	57.91	55.55	54.61
15	60.53	39.84	61.48	59.48	63.91	60.90	60.27

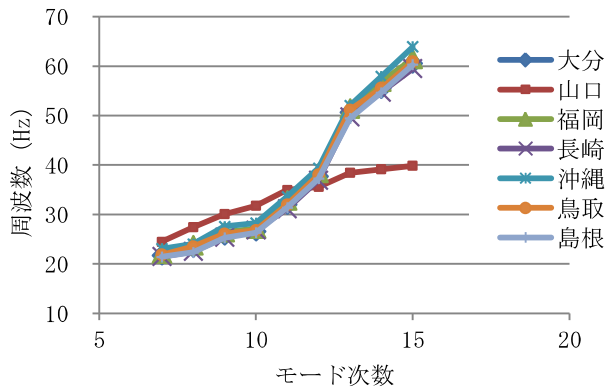


Fig. 4 各県のモーダル解析結果比較

また打撃試験においては、23.6Hz, 31.4Hz, 55.8Hzにおいて顕著なピークが見られた。これはモード次数8・11・14に相当していると思われる、解析結果と近い値となっている。

## 2.2 周波数応答解析

### 2.2.1 解析と実験の条件

モーダル解析および打撃試験に用いたモデルとサンプルを用い、周波数応答解析と振動試験機による振動試験を行った。モデル形状および実験と解析での評価ポイントをFig. 5に示す。ポイント①～③は板の長手方向辺の中央部、④と⑤はそれぞれ板の裏面の中央部である。解析時は最下面を完全固定とし、Table 4に示す条件で周波数応答解析を行った後に、評価点②～⑤について固有値における上下方向の変位量を求めた。振動試験はIMV社製 i230/SA2Mを用いてTable 5に示す条件で行った。また高速度カメラで評価点①～③部のマーカを撮影し、映像解析により上下方向の変位量を測定した。Fig. 6に試験時の様子を示す。

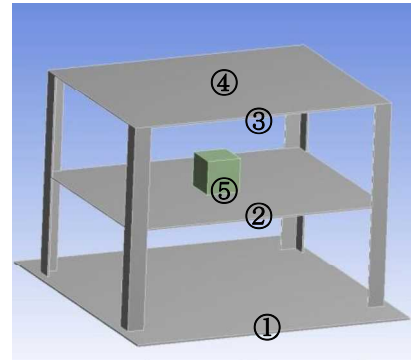


Fig. 5 周波数応答解析モデルの評価点

Table 4 周波数応答解析条件

振動数 (Hz)	加速度 (mm/sec <sup>2</sup> )	加振方向	一定減衰比
0～35	2942	Z軸方向	0.01

Table 5 振動試験条件

試験項目	垂直振動
試験範囲 (Hz)	5～30
加速度 (mm/sec <sup>2</sup> )	2942
Sweep 時間 (sec)	60



Fig. 6 振動試験の様子

### 2.2.2 解析と実験の結果

Fig. 7に振動試験における評価点①～③の変位測定結果のグラフを示す。グラフでの変位は基準位置からの双方向振れ幅を取っているため、基準値を差し引いた半分の値を解析値と比較した。Table 6に測定結果および解析で得られた評価点の変位量を示す。なお①は解析において完全固定面として変位は発生しないため、比較は②および③にて行った。

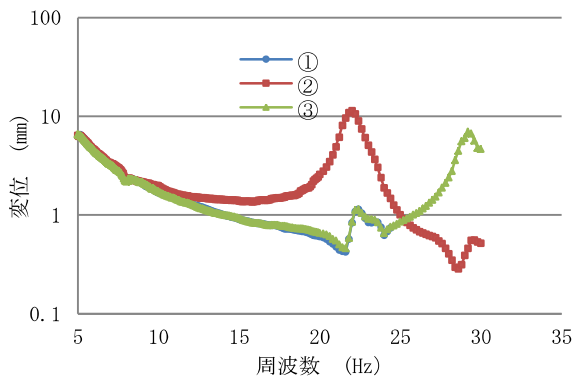


Fig. 7 高速度カメラによる変位測定結果

Table 6 振動試験と解析による変位比較

評価点	解析周波数 (Hz)	Z変位量解析値 (mm)	測定周波数 (Hz)	Z変位量測定値 (mm)
②	21.984	6.7913	22	5.4
②	31.469	0.1341	29.4	0.179
③	21.984	0.2018	22.2	0.318
③	31.469	4.2825	29.2	3.32
④	21.984	0.2549	-	-
④	31.469	5.4235	-	-
⑤	21.984	9.0172	-	-
⑤	31.469	0.1803	-	-

Table 6 より, 評価点②および③について, それぞれ 22Hz と 30Hz 付近にて解析値と測定値ともに大きな傾向を示している。わかりやすく比較するために, 評価点②の結果をもとに, 一定減衰比を 0.01 から 0.126 へ変更した解析結果を Table 7 に示す。

Table 7 振動試験と解析による変位比較 2

評価点	解析周波数 (Hz)	Z変位量解析値 (mm)	測定周波数 (Hz)	Z変位量測定値 (mm)
②	21.984	5.39	22	5.4
②	31.469	0.13	29.4	0.179
③	21.984	0.173	22.2	0.318
③	31.469	3.40	29.2	3.32

Table 7 より数mm以上の比較的大きな変位が生じる評価点においては, 減衰比を調整すると解析と測定値誤差が数%に収まり, 解析値と測定値の相対的な比が近い結果となった。一方でコンマ 1 mm 台の小さな変形が生じる部分においては誤差が大きくなっている。高速度カメラでの測定精度等の実験上の誤差か, 解析モデルによる差異の影響に

よるものか把握することが, 今後の検討課題と考えられる。

### 3. 構造物の熱応力解析

自動車や航空機のエンジンなど高温環境での使用が想定される製品については, 耐荷重性に加えて使用時の温度分布状況も考慮した設計が行われる。また温度上昇に伴い, 製品には熱膨張による熱応力が生じうるため, 熱応力に対する耐荷重性も評価しなければならない。CAE では伝熱解析により得られた温度分布状況を熱荷重として用い, 熱応力発生下での構造解析を実施できるものがあり (伝熱 - 構造連成解析などの名称で呼ばれる), センターの所有する「ANSYS」もその機能を有している。

しかし製品の温度分布は常に一定の状態にあるとは限らず, 加熱開始や終了時, 様々な外乱要因等により刻々と周辺の熱環境は変化する。そのため熱応力解析においても, 定常状態での応力だけを評価した場合には応力のピーク値を見逃すおそれがある。今回は時刻歴での温度分布ならびに熱応力解析を行い, 定常状態での応力と比較した。

#### 3.1 解析条件

Fig. 8 に解析モデルを示す。側面中央に  $\phi 2.5$  mm の直行した穴を持つ  $30 \times 30$  mm の板材 (厚さ 3.5 mm) 中央に,  $\phi 4.3$  mm で高さ 6 mm の円柱があるモデルの 1/4 形状とした。

下面に温度  $350^\circ\text{C}$  を設定し, 周辺温度と部品初期温度は  $20^\circ\text{C}$ , 部品下面と穴内面以外の面に熱伝達率 ( $40\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ) を設定した。応力解析の境界条件は部品下面の中心 1 点を完全固定した。なお材料物性値については, 高温環境下でも汎用的に用いられることの多いステンレス材料, また比較として熱伝導率の著しく低い磁器材料を想定し, 「IDAC ANSYS 材料特性データベース」より引用した。物性値を Table 8 に示す。

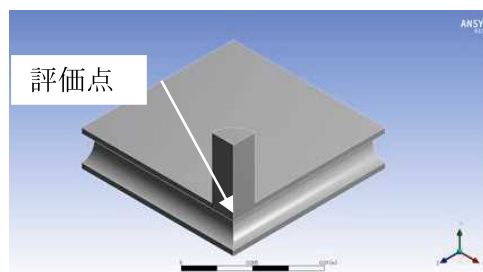


Fig. 8 1/4 熱応力解析モデル

Table 8 熱応力解析の材料物性値

物性	SUS304	磁器
ヤング率(GPa)	190	220.6
ポアソン比	0.29	0.22
線膨張係数(1/K)	$1.8 \times 10^{-5}$	$1.08 \times 10^{-5}$
引張強さ(MPa)	517	172
熱伝導率(W/m·K)	16.2	1.5
比熱(J/kg·K)	500	878
密度(g/cm <sup>3</sup> )	8.00	2.3

解析環境は下記のとおりとした。

ソフトウェア：ANSYS 17.1

要素タイプ：四面体2次要素

要素数：15754

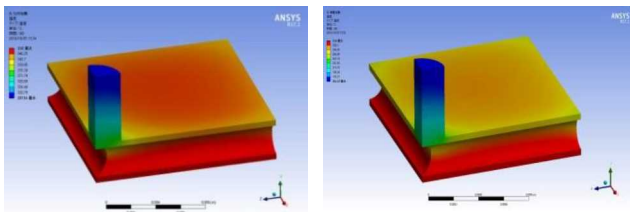
節点数：27386

時間ステップ：温度計算時は自由時間ステップ

(最小0.01秒, 最大0.1秒)

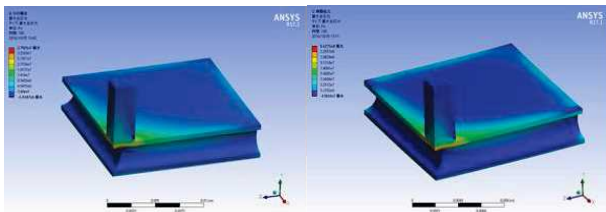
### 3.2 解析結果

Fig. 9 に定常状態における温度分布コンター図を、Fig. 10 に最大主応力のコンター図を示す。またそれぞれの材料について、評価点における温度の推移を Fig. 11 と Fig. 12 に、最大主応力の推移を Fig. 13 と Fig. 14 に示す。



a) SUS304 (評価点 333.2°C)    b) 磁器 (評価点 240.2°C)

Fig. 9 定常状態での温度分布



a) SUS304 (評価点 29.4MPa)    b) 磁器 (評価点 112.4MPa)

Fig. 10 定常状態での最大主応力分布

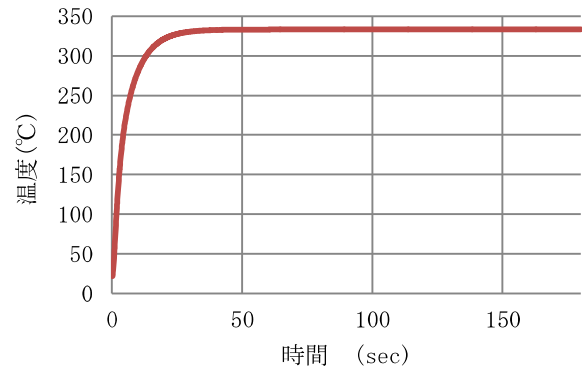


Fig. 11 評価点における温度推移(SUS304)

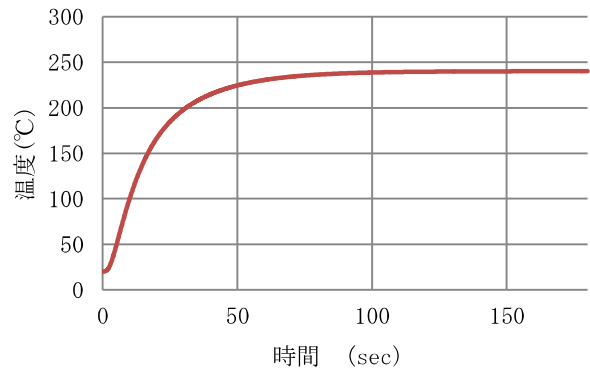


Fig. 12 評価点における温度推移(磁器)

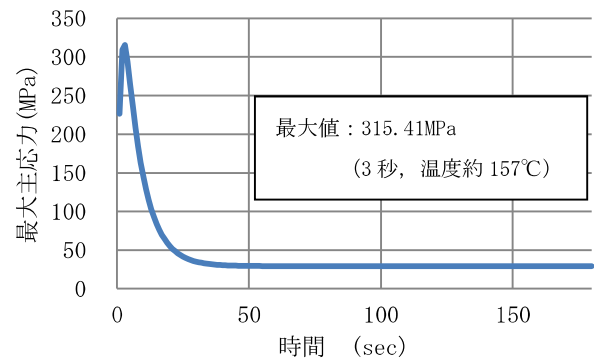


Fig. 13 評価点における最大主応力推移(SUS304)

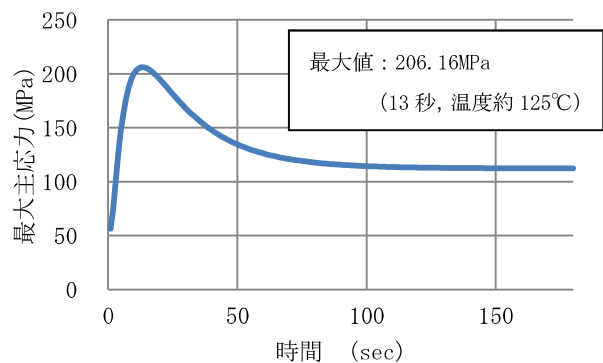


Fig. 14 評価点における最大主応力推移(磁器)

定常状態においては、磁器材料が 100MPa 以上の主応力が生じているのに対し、SUS304 では 30MPa 以下である。しかし時刻歴解析での評価点の温度ならびに主応力の推移では、SUS304 は加熱開始後数秒で定常状態の 10 倍以上の主応力が生じている。一般的な SUS304 の降伏応力は 250MPa 前後であるため、今回のモデルにおいては定常状態で評価した場合には熱応力に対し一見余裕がある設計であるが、実際には降伏変形が発生しうる設計であることがわかる。また解析開始後 5 秒で降伏応力を下回っているように、材料物性・形状によっては最大応力の生じる時間が非常に短くなるケースが起こりうるため、評価する時刻歴間隔を可能な限り細かく設定することが肝要である。

#### 4. まとめ

九州 CAE 研究会における共通課題、「構造物の周波数応答解析」、「熱応力解析」を行った結果、以下の結論を得た。

- 1) モーダル解析において、モデル拘束フリーの設定が不可能なソフトもあり、その場合固有値が大きく異なる。
- 2) 構造物の周波数応答において、変形挙動の大きなモードでの変位量は、実験と解析で近い値が得られた。
- 3) 構造物の周波数応答解析において、微小な変形挙動のモードでは変位量の誤差が大きかった。実験・解析いずれの影響によるか今後の検討課題である。
- 4) 熱応力解析において、時刻歴での解析では定常状態を大きく上回る応力が生じることがある。

#### 参考文献

- (1) モード解析入門 (コロナ社) : 長松 昭男 著