

# 3次元CAD/CAMおよびCAEを活用した生産工程の高度化に関する研究 —九州連携CAE研究会の活動—

南 晃\*, 松田豪彦\*, 堀之内悠介\*

## Study on Advance of Production Processes that Utilize the Three-dimensional CAD / CAM and CAE Technology

### — The Activity of a CAE Workshop that Cooperated in Kyushu —

Akira MINAMI, Takehiko MATSUDA and Yusuke HORINOUCI

近年、CAE技術に関する企業支援ニーズが高まっている。これに対応し、より高度な企業支援を提供するために、九州・山口各県の公設試のCAE担当者により「九州連携CAE研究会」を設立した。その活動の成果や知見は本県でも製品開発やトラブル解決などに活用されている。本報告では九州連携CAE研究会の活動として共通解析課題への取り組みについて報告する。

**Keyword :** CAE, 解析, 九州連携, データベース, 生産工程

## 1. 緒 言

新製品を開発するとき、その製品が必要な性能や強度、耐久性などを有しているか十分に検証する必要がある。従来は試作品を製作し、実験と設計変更を繰り返し行うことで検証していたが、多大な時間やコストがかかっていた。図1に従来の工程とCAEを導入した工程の比較を示す。

CAEはこれらの作業をコンピュータ上で再現可能であり、CAEを導入することで、試作、実験、設計変更の繰り返しを削減し、開発時間の短縮やコストの低減に大きく貢献することが可能である。

CAEは図2に示すようにCADデータ作成、メッシュモデル作成、解析条件設定等のプロセスがあり、メッシュモデルの要素の種類や大きさ、解析条件をどのように設定するかにより解析結果が変わってしまう。また、解析結果が得られても、それを評価するには、専門的な知識や経験に基づく高い技術力が必要とされ、そのためには、多くの解析事例や経験の蓄積が必要である。

## 2. 九州連携CAE研究会

図3に九州連携CAE研究会の概要を示す。平成19年度に九州・山口各県の公設試のCAE担当者により発足した。それまでは、CAEに関する企業支援は各県ごとに単独で行っていた。解析事例や技術情報、解析経験などの蓄積の機会も少なく、解析を行ってもその解析結果の妥当性を検証できる手段が乏しかった。

本研究会では、公設試が連携してCAE解析の解析条件設定や解析結果、評価方法など、単独では解決困難な問題を

明確化し、検討することで技術力向上と企業支援の強化を目的として活動している。

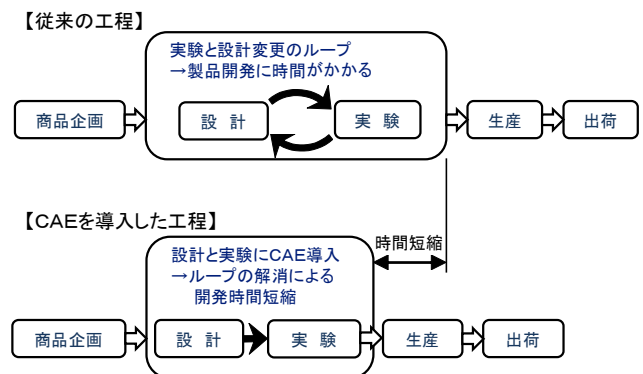


図1 従来工程とCAE導入工程の比較

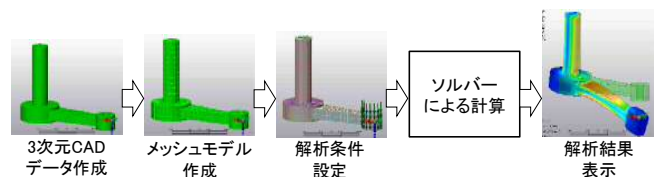


図2 CAEのプロセス

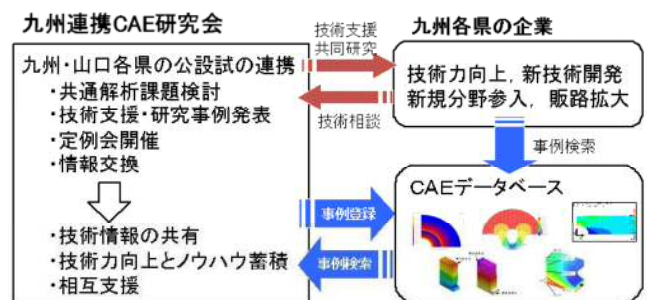


図3 九州連携CAE研究会の概要

\*生産技術部

3. 共通課題の解析, 検討

九州連携CAE研究会では定例会を開催し, 事例紹介や情報交換等を行っているが, 活動のひとつとして, 共通解析課題の検討を行っている。

CAEによる解析では, ソフトウェアの違いや解析条件設定の違いは解析結果に大きく影響する。

企業支援事例をもとに各県から提案された共通解析課題を, それぞれのCAEソフトで解析し, 解析結果について検討を行っている。得られた結果は報告書としてWebを利用したデータベースに登録している。表1に今まで実施してきた共通解析課題の一覧を示す。本報告ではこれらの中から3つの解析課題を以下に示す。

3. 1 円錐コイルバネの変位応力解析

コイルバネに荷重をかけて圧縮したときの変位や応力について, 理論値, 実際の実験結果, 各県の解析結果を比較して, 大変形をとまらう構造解析の際の注意点を検討した。

図4にコイルバネの形状および諸元を示す。このバネ諸元から解析モデルを作成した。境界条件は下部端面節点を完全固定, 上部接点に水平方向の拘束とし, 荷重は圧縮方向の荷重を6種類与えたときの静的な大変形解析を行った。その時のモデル形状および解析条件を図5に示す。

荷重とたわみの関係を図6に示す。解析結果と実験結果は良く一致することがわかった。ほとんどのソフトは陰解法を用いて計算しているが, 陽解法を用いたソフトが低めの解析結果となった。

理論式と実験結果に誤差が生じたのは, 理論式は理想的な状態での変形であるのに対し, 実際にはバネと治具との固定不足や摩擦などの要因が影響するためと考えられる。

このことから, CAEによる静的構造解析計算に関しては, 大変形をとまらなった場合でも理論式より実際の実験現象によく一致する精度の良い結果が得られることが分かった。

3. 2 剛体パンチによる弾性接触解析

剛体のパンチを弾性変形体へ押込む接触解析について, 弾性変形体の接触圧力の分布とパンチの押込み量を各公設試で解析し, 理論値との誤差や解析モデルの違いなどによる影響を検討した。

解析モデルのパンチは外径φ5mm, パンチの角R0.25mmの円筒形状とした。弾性体は円筒形状で, 高さAは各公設試で任意に設定し, 直径は高さAの2倍とした。

解析モデルの概略図と高さAの値を図7に示す。拘束条件は, 弾性変形体の下面を高さ方向への変位を拘束し, パンチを弾性体に押し込む荷重は50Nとし, 弾性変形体のヤング率210GPa, ポアソン比0.3とした。パンチは荷重を受けても全く変形しない完全剛体とし, 剛体の設定ができないソフトの場合, ヤング率を例えば10,000GPa程度と極端に

表1 共通解析課題一覧

No.	課題名
Sample01	くさび形状の構造物に対する静構造解析
Sample02	振動モータ用分銅の遠心力解析
Sample03	引張試験片に設けた円孔縁の応力解析
Sample04	組合せ円筒の応力解析
Sample05	熱応力解析における注意事項
Sample06	ヒートシンクの伝熱解析
Sample07	円錐コイルバネの変位応力解析
Sample08	固有値解析
Sample09	円筒容器内の温度分布解析
Sample10	剛体パンチによる弾性接触解析
Sample11-1	中空円管の弾性解析
Sample11-2	中空円管の弾塑性解析
Sample12	有限要素法における要素の影響

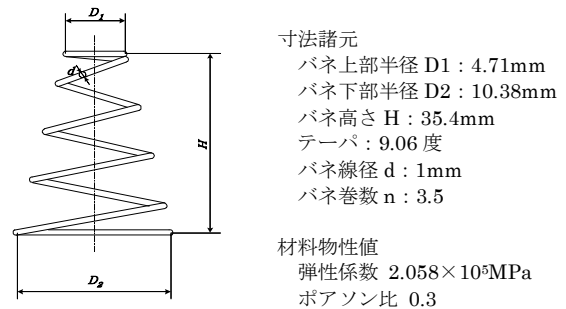


図4 コイルバネの形状および諸元

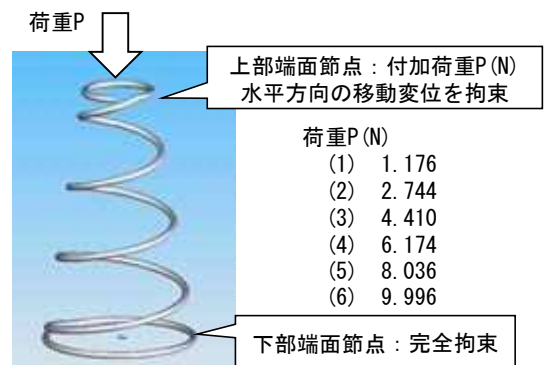


図5 モデル形状および解析条件

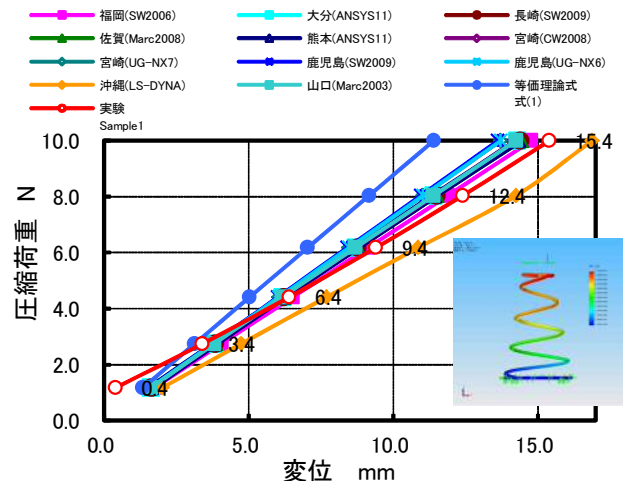


図6 荷重とたわみの関係

大きく設定し、擬似的に剛体として扱った。

剛体パンチの押し込みによる接触圧力 $\sigma_c$ はヘルツの理論により、(1)式で、押し込み量 $\delta$ は(2)式で表される。

$$\sigma_c = \frac{F}{2\pi R\sqrt{R^2 - r^2}} \quad \dots (1)$$

$$\delta = \frac{F(1-\nu^2)}{2RE} \quad \dots (2)$$

F: パンチの全荷重, R: パンチ半径, E: ヤング率

r: パンチ中心からの距離,  $\nu$ : ポアソン比

接触応力について、押し込み荷重50Nにおける各公設試の解析結果と(1)式から得られた理論値を図8に示す。

中心位置から離れるにしたがって接触圧力は2次曲線を描きながら小さくなった。ソフトによるばらつきはあるものの、各公設試とも理論値に沿うような結果が得られており、理論値との平均誤差は約10%以下であった。

次に、押し込み量について解析で得られた結果と(2)式から得られた理論値を図9に示す。押し込み量は、荷重を10~50Nの5段階に設定した時のモデルの中心位置の変位量とした。押し込み量は押し込み荷重に比例しており、接触圧力と同様に各公設試とも理論値に沿うような結果が得られ、理論値との平均誤差は約15%以下であった。

ここで、接触圧力および押し込み量について、パンチの角部に近づくにしたがって、理論値と解析値の差が大きくなる傾向にある。これは、変形体の接触面において、パンチの角の接触部は変形体の変位量が急激に変化する部位であり、そのため角部の要素の変形が他の部位に比べ大きいためと考えられる。

### 3.3 有限要素法における要素の影響

CAEでは、CADモデルを四面体や六面体の要素に分割して解析を行うが、その種類や大きさが解析結果に大きな影響を与える。

正方形断面の片持ち梁について、分割する要素の種類や大きさを違えた解析を各県で割り振って実施した。自由端に荷重を与えたときの自由端の変位について理論式と奇跡結果を比較し、要素の種類や大きさが解析結果に与える影響について検討した。

片持ち梁の解析モデルを図10に示す。寸法は断面10mm×10mm、長さ100mmとした。拘束条件は、片側端面を完全固定とし、荷重条件は自由端に100Nの荷重を与えた。材料物性値は弾性係数206GPa、ポアソン比0.3とした。

解析に用いる要素は、平面要素は三角形要素、四角形要素、立体要素は四面体要素とし、それぞれ一次要素、二次

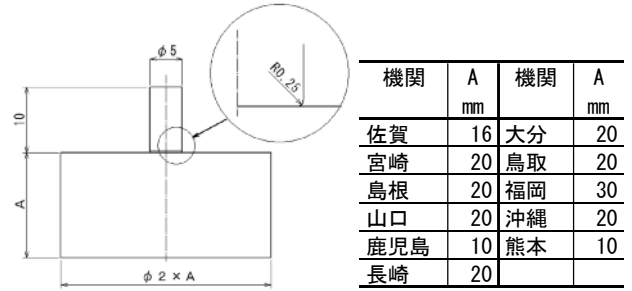


図7 解析モデルの概略図と高さAの値

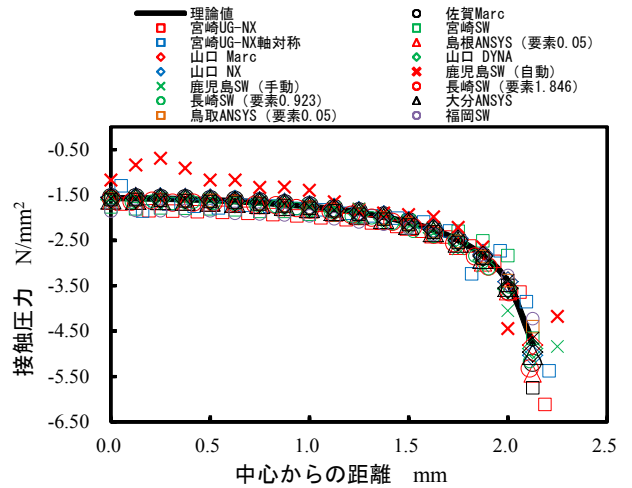


図8 モデル中心からの距離と接触応力

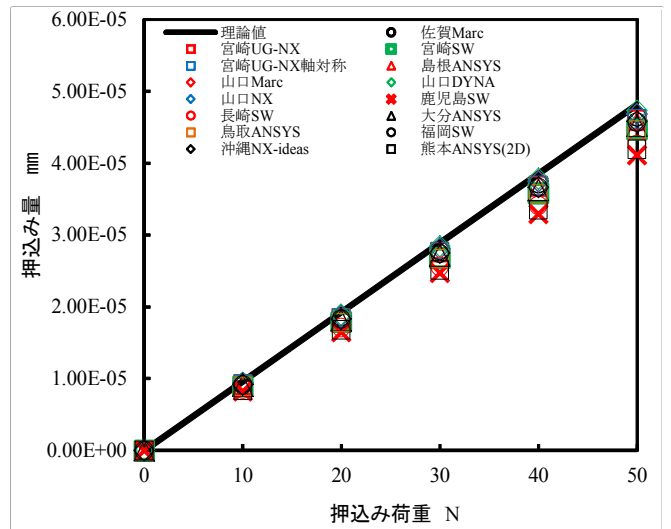


図9 押し込み荷重と押し込み量

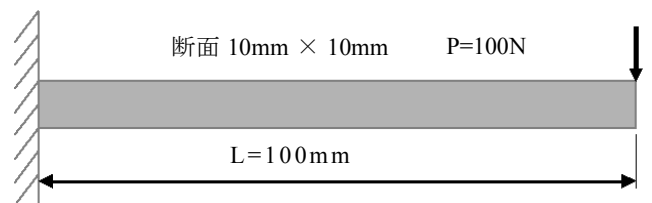


図10 片持ち梁の寸法および荷重

要素を用いた。図11に平面要素，図12に四面体要素の形状を示す。

図10の解析モデルについて，長さ×高さの分割数をそれぞれ2×2，10×5，5×10，10×10，50×10の5種類として，それぞれの要素の種類とサイズの組み合わせを各公設試に割り振って解析を実施した。

さらに，平面要素については，平面応力と平面ひずみの2つのモデルで解析を行った。

材料力学によって得られる片持ち梁の変位量  $\delta$  の理論式を(3)式に示す。

$$\delta = \frac{FL^3}{3EI} \left( 1 - \frac{3x}{2L} + \frac{x^3}{2L^3} \right) \dots (3)$$

F: 荷重, L: 梁長さ, I: 断面二次モーメント

E: 弾性係数, x: 荷重作用点から固定端に向かう距離

(3) 式より，今回の解析モデルにおける最大変位量  $\delta_{max}$  の理論値は自由端で  $\delta_{max} = 0.195\text{mm}$  となる。

平面ひずみモデルの解析結果と理論値との誤差を表2，平面応力モデルの解析結果と理論値との誤差を表3，四面体要素の解析結果と理論値との誤差を表4に示す。

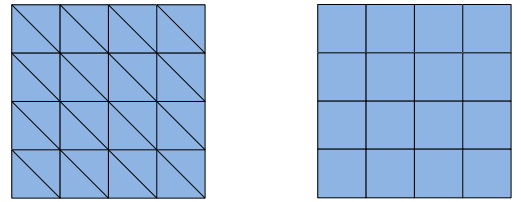
いずれも，一次要素に比べて二次要素の方が理論値との誤差は小さかった。通常，四角形一次要素は，ロッキング現象のため精度が悪いとされているが，四角形一次要素を用いても理論値との誤差が少ない結果が得られた。これは，各機関のCAEシステムでロッキングを防止する非適合モード（もしくは非適合要素）が使われていることが考えられる。しかし，非適合モードは比較的単純な形状の場合は問題ないが，形状が複雑になると解析精度が著しく低下するので注意が必要である。

また，平面ひずみと平面応力の解析結果を比較すると，平面応力の方が，理論値との誤差は要素分割数による影響が小さいことから，このモデルは平面応力で解析することが妥当であると考えられる。

#### 4. 結 言

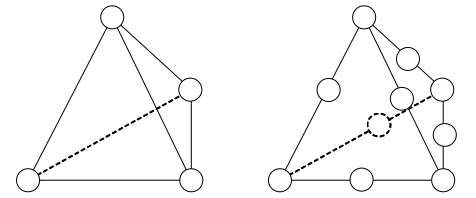
九州連携CAE研究会では年間3回定例会を開催し，CAEに関して様々な検討を行っている。得られた成果や知見は各県のCAEに関する企業支援に活用され，本県でもソーラーパネル用ブラケットの開発，リフト用部品破損の原因究明等，多くの企業支援への成果が得られている。

最近では，九州・山口だけでなく鳥取や島根，三重など他地域の公設試からのオブザーバーも加わり，九州連携CAE研究会の活動は広く認知されるようになった。今後も活動を活性化するとともに，研究会で得られた成果を県内企業への技術支援に活用していきたい。



(a) 三角形要素 (b) 四角形要素

図11 平面要素



(a) 一次要素 (b) 二次要素

図12 四面体要素

表2 平面ひずみモデルの解析結果と理論値との誤差

分割数	三角形 一次	三角形 二次	四角形 一次	四角形 二次
2×2	0.0072 (96.3%)	0.177 (9.2%)	0.0181 (90.7%)	0.188 (3.6%)
10×5	0.0854 (56.2%)	0.190 (2.6%)	0.175 (10.3%)	0.1786 (8.4%)
5×10	0.035 (82.1%)	0.176 (9.7%)	0.185 (5.1%)	0.176 (9.7%)
10×10	0.0852 (56.3%)	0.190 (2.6%)	0.189 (3.1%)	0.191 (2.1%)
50×10	0.166 (14.9%)	0.191 (2.1%)	0.191 (2.1%)	0.192 (1.5%)

表3 平面応力モデルの解析結果と理論値との誤差

分割数	三角形 一次	三角形 二次	四角形 一次	四角形 二次
2×2	0.0073 (96.3%)	0.182 (6.7%)	0.0184 (90.6%)	0.193 (1.0%)
10×5	0.0873 (55.2%)	0.195 (0.0%)	0.194 (0.5%)	0.1969 (1.0%)
5×10	0.035 (82.1%)	0.195 (0.0%)	0.191 (2.1%)	0.194 (0.5%)
10×10	— (—%)	0.195 (0.0%)	0.194 (0.5%)	0.196 (0.5%)
50×10	0.183 (6.2%)	0.196 (0.5%)	0.196 (0.5%)	0.196 (0.5%)

表4 四面体要素の解析結果と理論値との誤差

分割数	四面体一次	四面体二次
2×2	0.00701 (96.4%)	0.1765 (9.5%)
10×5	0.08991 (53.9%)	0.1944 (0.3%)
5×10	0.034 (82.6%)	0.1915 (1.8%)
10×10	0.093 (52.3%)	0.1939 (0.6%)

#### 参 考 文 献

1) 九州連携CAE研究会編：共通課題事例集(2016)