

九州連携CAE研究会におけるCAE解析事例

南 晃^{*1}，永田正道^{*2}，牛尾雅樹^{*3}，田中徹^{*4}，小楠進一^{*5}
清水慎吾^{*6}，土村将範^{*7}，河北隆生^{*7}，外山真也^{*8}，泉川達哉^{*9}

Cases of CAE Analysis in CAE study group of Kyushu

Akira MINAMI, Masamichi NAGATA, Masaki USHIO, Toru TANAKA, Shinichi KOGUSU

Shingo SHIMIZU, Masanori TSUCHIMURA, Ryusei KAWAKITA, Shinya TOYAMA and Tatsuya IZUMIKAWA

九州・山口各県公設試のCAE担当者間の交流と技術的情報の蓄積と共有を目的として、平成19年度に九州連携CAE研究会を設立した。その活動のひとつとして、共通の解析課題を各県のCAEシステムで解析し、その結果を共同で検討・集約を行った。

6種類の線形静解析および伝熱解析の課題に取り組み、理論値や実験値によく合致した解析結果を得ることができた。また、解析にあたっての注意点を抽出することができた。

Keyword : CAE, 解析事例, 九州連携

1. 緒 言

近年、製造業において3次元CADを中心とするデジタルエンジニアリングに対するニーズが増加している。当センターにおいて技術支援のために導入したCAD/CAM/CAEを表1に示す。

表1 当センターのCAD/CAM/CAE

種 類	用 途	名 称	導入年度
3次元CAD	立体的なCADモデル作成	Solid Works	H21
		Unigraphics NX2	H12
		Unigraphics NX6	H18
CAM	NCデータの自動作成	Unigraphics NX2	H12
		Unigraphics NX6	H18
		CAM-magic	H21
射出成形CAE	樹脂射出成形のシミュレーション	Mold Flow	H18
線形CAE	微小変形における機械部品等の応力・変位・熱伝導などの解析	Unigraphics NX6	H18
線形/非線形CAE	大変形における機械部品等の応力・変位・熱伝導などの解析	Solid Works Simulation	H21
流体CAE	気体・液体の流れや熱変化を解析	Solid Works Flow	H21
プレスCAE	プレス加工シミュレーション	Stampack	H21

九州・山口各県の公設試においてもCAD/CAM/CAEの導入が進んでいるが、その中でもCAEはコンピュータ上で製品の機能や性能をシミュレーションすることで、設計・試作工程の工数低減や高度化が可能な技術として近年注目されている。

CAEを適切に活用するには、解析におけるモデル作成や条件設定を適切に行う必要があり、専門的な知識や解析事例の蓄積が不可欠である。これを単独で行うことは容易ではなく、多大な時間が必要である。

CAEに関する情報交流を活性化し、技術情報や解析事例等を共同で行うことで短時間に技術情報の蓄積を行うことを目的として、九州・山口9県の公設試験研究機関が連携して平成19年度に九州連携CAE研究会を設立した。

2. CAEについて

2.1 CAEの概要

例えば、機械部品の設計を行う場合には材料力学的な計算を行い形状や寸法を決定する。その際には単純な梁形状などに近似して計算を行い、実際の形状との差はそれまでの経験を踏まえて修正する方法がとられる。

しかし、この方法では設計者の経験などに左右される上に最適設計が困難である。このため、何回も試作を行い、設計変更を繰り返すためにコストや時間がかかっていた。

CAEでは開発する製品の機能や性能のシミュレーションをコンピュータ上で行うことで、実際に試作することなく最適設計が可能となる。主なCAEの種類を表2に示す。

^{*1} 機械技術部，^{*2} (地独)山口県産業技術センター，
^{*3} 福岡県工業技術センター，^{*4} 佐賀県工業技術センター，
^{*5} 長崎県工業技術センター，^{*6} 大分県産業科学技術センター，
^{*7} 熊本県産業技術センター，^{*8} 宮崎県工業技術センター，
^{*9} 沖縄県工業技術センター

表2 主なCAEの種類

構造解析	構造物への荷重に対する応力や変形の解析 線形解析：変形が微小な場合 非線形解析：変形が大きい場合
伝熱解析	構造物内の温度分布の解析
熱流体解析	液体や気体の流れや温度分布の解析
電磁場解析	電磁波や磁力などを使用する物体と電場磁場の相互作用の解析

2.2 CAEによる解析

一般的なCAEのひとつに有限要素法による線形解析がある。これは材料が弾性変形域内に収まるような微小な変形のとくに用いる構造解析の手法である。以下に有限要素法による線形解析の手法を示し、その手順を図1に示す。

- (a) CADでモデルを作成する。2次元でも3次元でも可能だが、近年は3次元CADモデルを扱うことが多くなっている。
- (b) このモデルをもとに、小さなメッシュ要素に分割する。これをメッシュ分割と呼ぶ。要素サイズは解析結果に大きく影響する。一般に要素サイズが大きいと解析時間は短くなるが精度は低下する。
- (c) 材料特性、拘束条件、荷重条件など解析に必要な条件を入力する。これらの条件設定のやりかたは解析

の目的によっても変わる。また、実際の現象に即した条件を与える必要もある。

- (d) 解析を実行し、応力や変位の大きさ、分布などの結果を表示する。

3. 九州連携CAE研究会の活動

3.1 共通課題の解析

前述したように、CAEはメッシュ分割、拘束条件、荷重条件などを適切に設定する必要がある。これらはCAEシステムが自動的に判断して行うわけではなく、解析を行う人が判断しなくてはならない。そのためには専門的な知識や解析事例などの技術的蓄積が必要であるが、単独では短時間に必要な技術的蓄積を行うことは困難である。

そこで九州連携CAE研究会では

- ・短時間でより多くの技術的蓄積を図る
- ・CAEシステム間の操作性や機能、解析結果の相違を把握する
- ・解析における注意点を抽出する

などを目的として、同一課題を各県のCAEシステムで解析し、それぞれの解析条件設定の方法、解析結果の相違、解析における注意点などについて検討・集約を行った。表3に平成19年度から21年度の解析事例を示す。

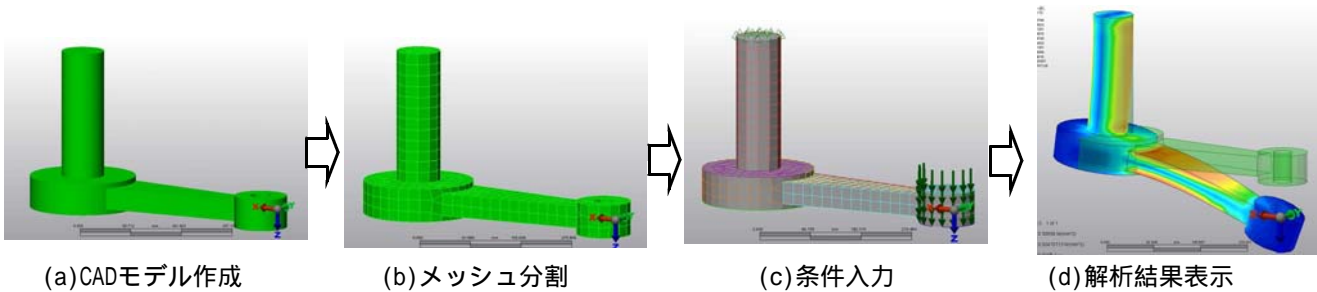


図1 CAEの手順（有限要素法による線形解析）

表3 共通解析事例（平成19年度～21年度）

No	共通課題名称	解析の概要	解析の適用例
1	楔形状の応力（線形静解析）	断面形状が一定でない片持ち梁の端面に荷重を加えたときの変位・応力の解析	機械部品、自転車のフレームなど
2	振動モータ用分銅の遠心力（線形静解析）	分銅が回転する時に発生する遠心力による変位・応力の解析	モータ、タービン、フィンなど
3	円孔のある引張試験片の応力解析	円孔のある薄板の引張試験における変位・応力解析	板金部品、薄板製品など
4	組み合わせ円筒の応力解析	内圧が作用する組み合わせ円筒の応力解析	焼嵌め製品
5	温度分布（伝熱・熱応力連成解析）	直方体に穴をあけ、その穴を冷却したときの温度分布および応力・変位解析	金型やエンジンブロックなどの冷却
6	各種形状の冷却フィンがある物体の温度分布（伝熱・熱応力連成解析）	ヒートシンク等に見られるような冷却フィンの形状を変えたときの温度分布および応力・変位解析	ヒートシンクなど空冷する部品

3.2 解析事例

以下に解析事例の概要を示す。解析事例は各県の技術支援事例や実験結果等をもとに作成した。

モデル形状や寸法、荷重条件、拘束条件等の主要な条件はあらかじめ設定しておく。この条件のもとで各県がそれぞれ解析を行い、結果を持ち寄って検討し集約を行った。

その過程で、設定された条件以外の解析条件の差、CAEシステムの違い、解析手順の違いなどによる解析結果の違いがどの程度あるか、解析する際の注意点などについて検討した。

3.2.1 楔形状の応力解析

楔形状の一端を固定し、他端に鉛直下方向の荷重をかける断面形状が一様でない片持ち梁の解析を行った。通常このような場合は単純片持ち梁に近似するなどして計算を行うが、計算の精度は低下する。また、断面形状の変化の大きい場所にあった場合、応力集中が発生して計算結果が役に立たなくなることもあり得る。しかし、CAEを用いることで精度の高い応力分布や変位分布を得ることが可能である。

図2に解析事例1のモデル形状、荷重条件、拘束条件を示す。メッシュ分割は、各県のCAEシステムでの自動分割機能を用いて処理し、応力および変位について解析結果を比較した。材料はステンレス鋼とした。

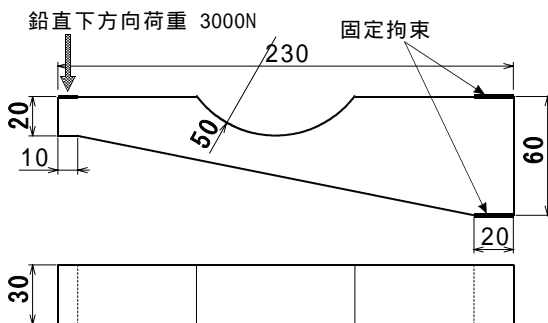
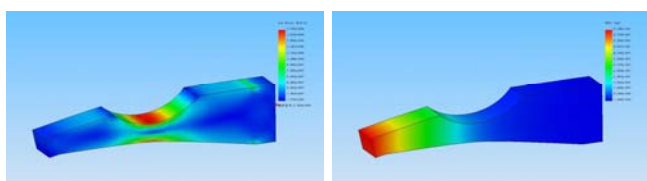


図2 解析事例1のモデル形状と解析条件

図3に応力および変位の解析結果、表4に各県のCAEシステムにおける解析結果を示す。最大応力の平均は 1.79×10^8 MPaで、各県の結果はその5%以内、最大変位の平均は0.625mmで、各県の結果はその1%以内に収まっており大きな差異のないことがわかった。



(a) 応力解析結果

(b) 変位解析結果

図3 楔形状の応力および変位分布

表4 楔形状の応力解析結果

県名	CAEシステム	最大変位 [mm]	最大応力 (Von Mises) [$\times 10^8$ MPa]
山口	I-DEAS	0.625	1.80
福岡	MSC Marc	0.625	1.77
佐賀	MSC Nastran	0.625	1.81
	MCS Marc	0.625	1.80
長崎	I-DEAS	0.622	1.80
大分	ANSYS	0.629	1.83
熊本	ANSYS	0.626	1.80
宮崎	cosmosXpress	0.625	1.79
	Unigraphics NX4	0.625	1.79
鹿児島	Unigraphics NX2	0.621	1.73
沖縄	I-DEAS	0.628	1.80

3.2.2 分銅の遠心力解析

振動モータの回転で分銅に遠心力が作用した時の応力・変位を解析し、各県のCAEシステムでの解析結果の比較や解析の際の注意点などを検討した。分銅に回転数9rpmを与え、反重心側の軸との接触面の角度60度の範囲に拘束を設定した。材料は超硬材料とした。図4にモデル形状、荷重条件および拘束条件を示す。

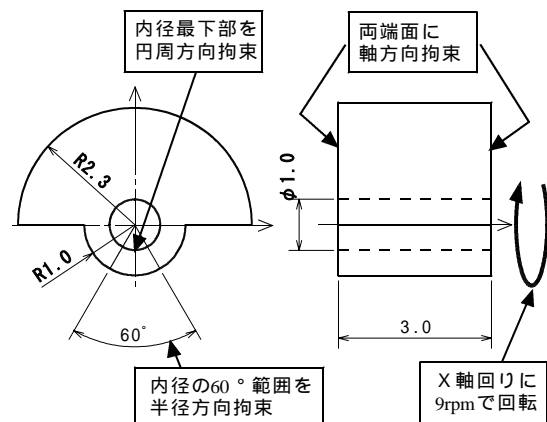


図4 解析事例2のモデル形状と解析条件

応力と変位分布の解析結果の例を図5、各県の解析結果を表5、メッシュ形状ごとの要素数と変位量の関係を図6に示す。メッシュは解析モデルを構成する細かい要素であり、その形状はいくつか存在する。本事例では四面体と六面体を使用され、鹿児島県は四面体を使用した。

解析の結果、四面体グループでは他県の最大変位は $4.53 \sim 4.76 \mu\text{m}$ とほぼ変わらなかったが鹿児島県は $2.01 \mu\text{m}$ と小さかった。この要因として、鹿児島県の要素数が小さいことがあげられる。一般に、要素数の変化に伴い解析結果も変化するが、一定の要素数以上になるとその後は解析結果の変化はごく小さくなる。図6のグラフ中の曲線に示すよ

うに、要素数283と小さい鹿児島県の場合、最大変位も小さくなる。しかし、沖縄県の要素数1421を越える長崎県、宮崎県、佐賀県の最大変位はほぼ変わらなかった。このことから本事例の場合、要素数は1400程度以上必要であることがわかった。

六面体グループでは、大分県の427という要素数でも他県と同様な解析結果が得られていることから、六面体では要素数が少なくても解析結果はあまり変化しないことがわかった。

最大応力は全体的にバラツキが大きく、CAEシステムや要素数など解析条件が違うと解析結果に差が生じることが確認できた。

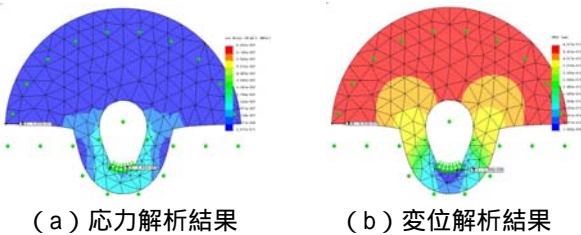


図5 応力および変位分布の解析結果の例

表5 分銅の応力および変位解析の結果

県名	CAEシステム	最大変位 [μm]	最大応力 (Von Mises) [$\times 10^{-7}$ MPa]
山口	MCS Marc	4.73	4.84
福岡	MSC Marc	4.89	4.27
佐賀	MCS Marc	4.76	4.20
長崎	I-DEAS	4.57	4.10
大分	ANSYS	4.90	3.52
熊本	ANSYS	5.79	5.02
宮崎	Unigraphics NX4	4.15	2.65
鹿児島	Unigraphics NX2	2.01	2.73
沖縄	I-DEAS	4.53	2.55

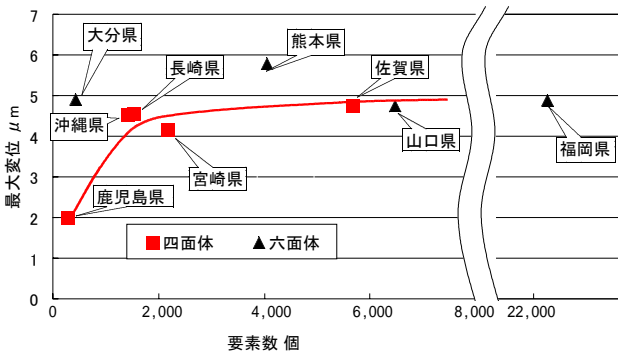


図6 要素数と最大変位の関係

また、遠心力は回転中心から放射状に働くので、本来、

解析結果は図7(a)に示すように対称となる。しかし、解析結果を検討する過程で、宮崎県と鹿児島県で使用しているUnigraphics NXにおける解析結果が図7(b)に示すような非対称な解析結果となった。

これは拘束条件を付加するとき、円筒面を構成する要素の粗密などによって、各要素の法線方向が円筒の中心を向くとは限らないことに起因することがわかった。拘束条件や荷重を付加する対象をCADモデルにするかメッシュモデルにするかは注意すべき点である。

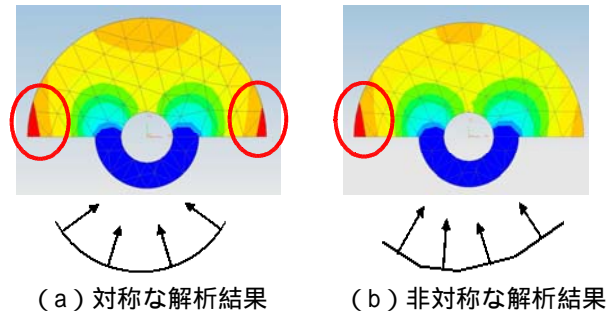


図7 解析課題2における拘束条件設定の注意点

3.2.3 円孔のある引張試験片の応力解析

JIS Z 2201 に定義する1号引張試験片の中央部に設けた円孔の縁に発生する応力を有限要素法により求め、解析結果を実験値および理論値と比較した。材料は炭素鋼とした。図8に引張試験片の形状と測定位置を示す。

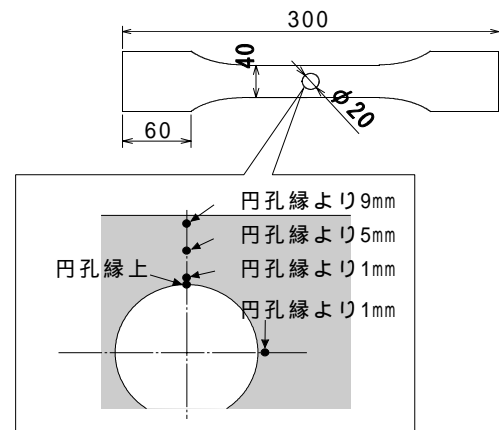


図8 引張試験片の形状及び測定位置

図9に応力分布の解析結果の例、表6に各県における解析結果を示す。各県のCAEシステム間における大きな差異は見られなかった。理論値との比較では5%以内、実験値との比較では5~11%の範囲内に収まっていた。

実験値との比較で誤差が大きくなっているのは、実際の実験においての試験片のわずかな傾斜や把持具のすべりなどが原因であると考えられる。

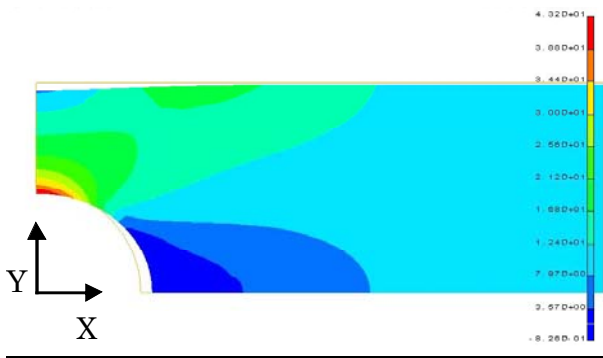


図9 応力分布の解析結果の例

表6 円孔のある引張り試験片の応力解析結果

県名	CAEシステム	各測定点における応力(MPa)				
山口	I-DEAS	9.7	18.1	32.1	-11.2	43.7
福岡	MCS Marc	10.0	18.4	33.9	-11.1	43.9
佐賀	MCS Marc	9.9	18.0	33.5	-10.6	40.8
長崎	I-DEAS	9.9	17.5	33.7	-10.6	43.2
大分	ANSYS	10.0	18.1	33.3	-10.5	43.1
熊本	ANSYS	9.8	16.9	32.4	-10.7	43.3
宮崎	Cosmos Works	10.1	18.1	32.5	-10.4	43.4
鹿児島	Unigraphics NX6	10.5	17.2	30.7	-10.0	41.8
沖縄	I-DEAS	9.9	17.9	33.5	-10.6	43.1
参考	-	10.9	17.5	30.5	-10.0	43.2

測定点 は最小応力

参考の ~ は実験値, は理論値

3.2.4 組合せ円筒の応力解析事例

内圧が作用する焼き詰めされた組合せ円筒の応力を解析し、理論解との比較を行った。

焼き詰めは回転軸や車輪等の締結に使用される。軸を穴に固定するとき、軸径を穴径より少し大きめに作り、受ける穴を加熱し膨張させて広げて軸をはめ入れる。冷却すると穴はもとに戻るので強固な締結が可能である。しかし、このときに生じる圧力が強すぎると破壊の原因となる恐れがある。

図10にモデル形状を示す。図中に示す組合せ円筒の焼き詰め解析およびこの組合せ円筒に内圧 $P_1 = 400\text{MPa}$ が作用する場合の解析を行った。円筒の厚さは特に指定せず、2次元形状または薄板形状として解析を行った。材料は軟鋼とした。

焼き詰め状態の再現方法は、沖縄県のみ温度負荷を予変形に利用した解析を行い、他の県であらかじめ内外円筒を食い込ませた状態から材料の弾性による変形の戻りを利用した接触による解析を行った。図11に接触解析と温度付加解析の結果の例、図12に円周方向応力分布の比較を示す。

最大応力は各県とも理論値に近い値が得られており、その差も10%以内に収まっている。接触解析は組合せ円筒全体で理論値と良く一致しているが、温度負荷解析では内円筒の応力値が若干過小評価になった。これは、温度負荷解析では、内円筒（縮み）、外円筒（拡がり）の変形状態に応じた温度条件の設定が試行錯誤的となるため、変形量に理論値との差が生じたものと考えられる。

以上のことから、接触解析はシミュレーションによる焼き詰め再現方法として有効であるが、温度負荷解析を利用する場合には、注意する必要があることがわかった。

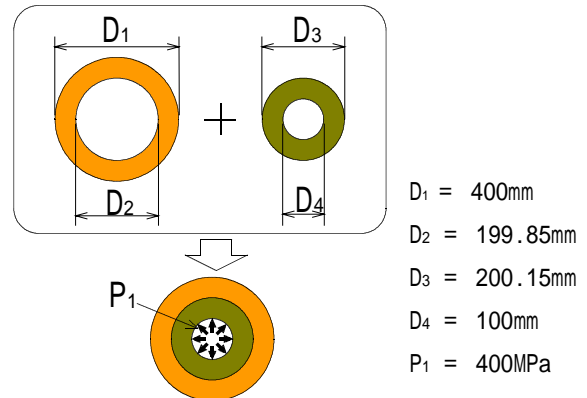


図10 モデル形状

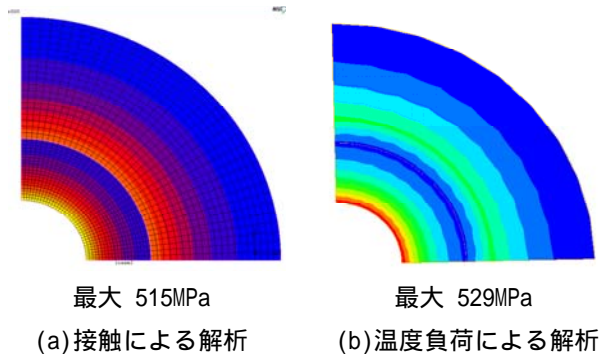
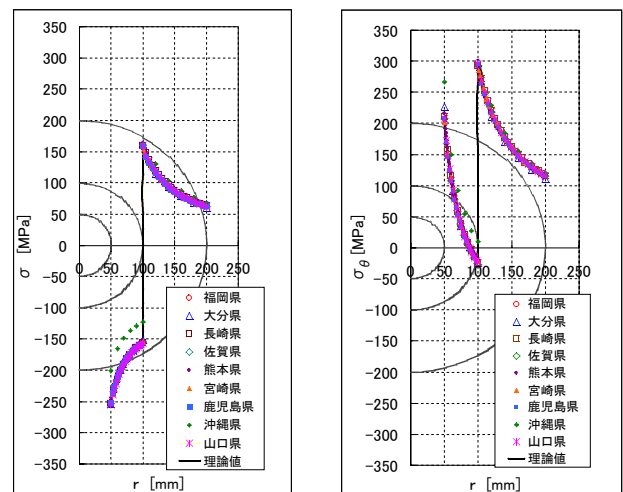


図11 応力分布の解析結果の例



(a) 焼き詰めのみ

(b) 内圧あり

図12 円周方向応力分布の比較

3.2.5 温度分布解析

物体が加熱および冷却されたときの解析を行い、各県のCAEシステムの違いやメッシュ分割の違いが解析結果にどのような影響を及ぼすかを検討した。材料は炭素鋼とした。

図13にモデル形状および解析条件を示す。直方体の中心に円筒管があり、その中を10の冷却水を流す。一方、直方体の底面は、150で加熱し、4点の固定点で固定する。その他の面は断熱とした。

また、モデル形状は図13に示すA-A'およびB-B'を対称面とした対称形状である。このような場合、モデルを対称面で分割し、対称面に対称拘束条件を与えることで要素数を少なくして解析時間短縮を図ることができる。本事例ではA-A'およびB-B'を対称面とした1/4モデルで解析を行った。

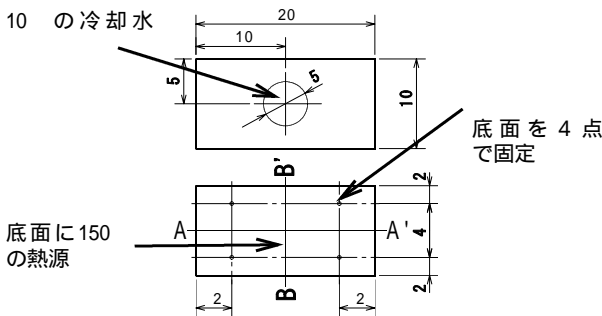


図13 モデル形状および解析条件

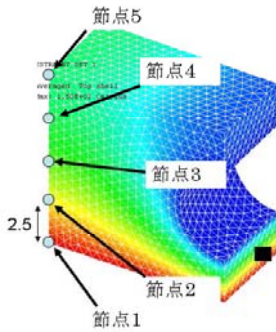


図14 温度測定点

表7 温度分布解析結果

県名	CAEシステム	節点温度 ()				
		1	2	3	4	5
山口	MCS Marc	150	114.25	86.10	69.35	63.96
福岡	MCS Marc	150	114.25	86.10	69.34	63.96
佐賀	MCS Marc	150	114.25	86.10	69.35	63.96
長崎	I-DEAS	150	114.00	86.10	69.30	64.00
大分	ANSYS	150	114.25	86.10	69.35	63.96
熊本	ANSYS	150	114.85	86.33	69.64	63.97
宮崎	Cosmos Works	150	114.30	86.10	69.35	63.96
鹿児島	Unigraphics NX6	150	113.20	84.80	68.10	62.80
沖縄	I-DEAS	150	114.23	86.08	69.33	63.95

上記の条件で温度分布解析を行い、図14に示す節点1～5における温度を調べた。その結果を表7に示す。

どのCAEシステムにおいてもほぼ一致した結果が得られることがわかった。

3.2.6 冷却フィンがある物体の温度分布解析

熱源の温度上昇を抑えるヒートシンクに関して伝熱解析を実施し、温度分布や熱応力による変形について各県で得られた解析結果の検討や解析上の注意点を議論した。

図15に解析モデルの基本形状を示す。基本形状の外形は下面が10mm×26mmで上面が10mm×22mm、高さは13mmとした。また、下面から3mmまでが下面と同じ大きさの断面積をもち、それ以上は上面と同じ断面積の形状とした。

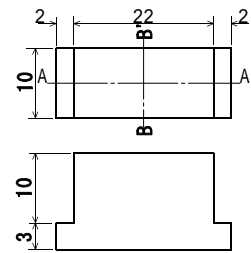


図15 解析モデルの基本形状

解析の条件を図16に示す。材料はアルミ合金とした。下面を発熱量 $2.31 \times 10^{-3} \text{ W/mm}^2$ の熱源とする。フィンを含む下面以外の面は周囲への放熱として熱伝達係数 $10 \text{ W/m}^2 \cdot$ とし、周辺空気温度は15とした。輻射の影響は無視して解析を行った。モデル形状はA-A'およびB-B'を対称面とした対称形状なので、解析モデルは1/4分割モデルとし、対称面には対称拘束条件を与えた。

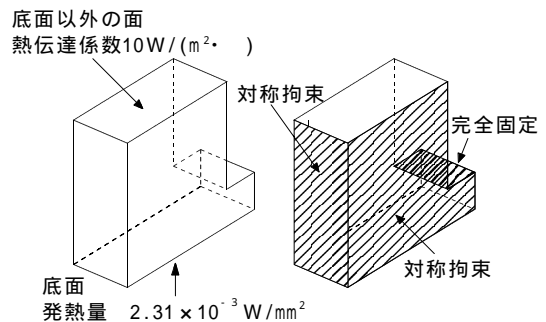


図16 解析条件

図17に冷却フィン形状のパターンを示す。ベースとなる基本形状の他に6種類の冷却フィン形状を用意し、各県で2～3種類ずつ分担して解析を行った。

図18に形状1における温度分布と熱応力の解析結果の例を示す。表8に各形状における最低温度、最高温度、最大変位の解析結果を示す。

各形状において、最低温度がバラツキなく得られ、基本形状に対しても大幅に低下している。このことから、冷却フィンの効果を検証することができた。

しかし、最大変位におけるバラツキは大きく、その要因

は明確になっておらず、今後の課題である。

また、鹿児島県と宮崎県で使用しているUnigraphics NXで、図19に示すように1/4分割の対称拘束条件を与えた場合、対称面が交差するエッジ部分では対称拘束が重複するために意図した対称拘束条件が得られないことがわかった。これを回避するためには拘束条件を与えたあと、重複部分だけを削除することで対応できることもわかった。

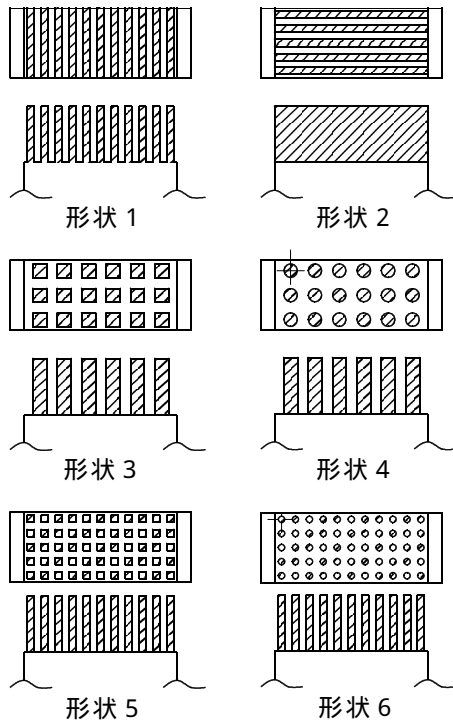


図17 冷却フィンの形状パターン

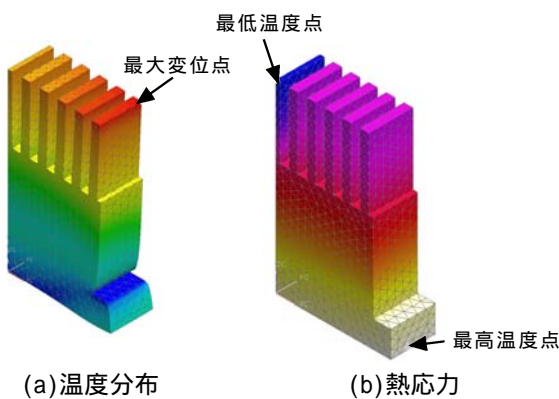


図18 温度分布と熱応力解析結果の例

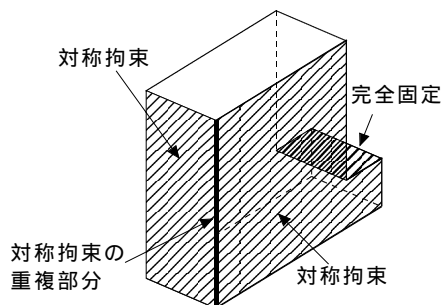


図19 対称拘束の重複

表8 各フィン形状における解析結果

形状	県名	CAEシステム	最低温度 []	最高温度 []	最大変位 [μm]
基本形状	大分	ANSYS	68.71	68.85	8.72
	佐賀	MCS Marc	70.77	70.91	9.08
	長崎	Solid Works Simulation	68.55	68.65	8.72
	鹿児島	Unigraphics NX6	68.56	68.70	7.33
	沖縄	I-DEAS	68.70	68.90	9.49
	1	山口	I-DEAS	34.62	34.90
福岡		MCS Marc	34.36	35.42	0.15
2		福岡	MCS Marc	34.04	32.99
	大分	ANSYS	35.22	35.50	3.20
3	長崎	Solid Works Simulation	41.15	41.45	4.30
	熊本	ANSYS	41.35	41.64	4.31
4	熊本	ANSYS	44.57	44.87	4.84
	宮崎	CosmosWorks	44.57	44.87	4.74
	宮崎	Unigraphics NX4	44.60	44.80	4.54
5	佐賀	MCS Marc	36.38	36.75	5.96
	宮崎	CosmosWorks	35.58	35.94	3.35
	宮崎	Unigraphics NX4	35.70	36.10	2.53
6	山口	I-DEAS	40.02	40.39	6.56
	鹿児島	Unigraphics NX6	38.74	39.12	3.92
	沖縄	I-DEAS	38.90	39.30	4.72

4. 結 言

九州・山口9県でCAEに関する研究会を行い、6個の解析事例に取り組んだ結果、以下のような成果が得られた。

- (1) 線形静解析，伝熱解析および熱応力解析で6事例における解析結果および技術的な蓄積を得られた。
- (2) メッシュ分割において要素サイズが解析結果に大きく影響することがわかった。
- (3) 解析条件を与えるときにCAEシステムの特徴を把握しないと誤った解析条件で解析を行う危険性があることがわかった。

解析事例に取り組んできて、解析の考え方や手法、注意点などに関して大きな成果を得ることができた。本報告はその概要を記載したが、詳細に関しては九州連携CAE研究会に参加している公設試の各担当者に問い合わせいただきたい。

九州連携CAE研究会では、今後もこのような解析事例への取り組みを継続する予定である。