

# CAEを用いた「思考・創造」型のものづくり教育

北陸職業能力開発大学校 増川 一郎

An Examination of the new engineering education system to develop a design/  
manufacturing ability with CAE system

Ichiro MASUKAWA

**要約** 有限要素法を中心としたCAEを用いて「思考・創造・開発」をキーワードとしたものづくり教育を計画・実施した。

航空機構造に画期的な進歩をもたらしたCAEは、他の工学分野へも普及し様々な分野で応用され浸透している。しかし、CAEは、導入さえすればすぐに効果を出せるというものではなく、設計開発のツールとしてCAEを十分に活用するためには、専門的かつ広範囲な知識、技能・技術が求められる。このような状況の中、当大学校においては、CAEを活用したものづくり教育の一例として、実際の物理現象を有限要素法解析の数値モデルへの置き換えから、適切な解析結果の評価とその対処を行うことができる技術者を育成することを目指しカリキュラムを計画・実施している。また、「思考・創造」をキーワードとして学生自身が考え答えを導き出す、思考型・設計型・開発型の授業を展開するための手助けを行うツールとしてCAEを活用する。

## I はじめに

有限要素法の最初の試みが、ボーイング社において亜音速機の剛性解析に用いられてからすでに40有余年になる。航空機構造に画期的な進歩をもたらしたこの新技術は他の工学分野へも普及し、自動車、航空宇宙、造船、金型加工、土木建築、電気電子、ゴム製品、スポーツ用品等様々な分野で応用され浸透している。

有限要素法解析を中心としたCAEは、コンピュータ上で仮想実験（計算機実験ともいう）を行い、これにより、製品の企画・開発・設計段階で予め不具合が発生しないかどうか、コンピュータシミュレーションを繰り返し行い、開発初期段階で不具合を取り去ることにより、製品開発期間とコストを削減させようとするものである。

しかし、有限要素法を中心としたCAEは、導入すればすぐに効果を出せるというものではなく、設計開発のツールとしてCAEを十分に活用するためには、

専門的かつ広範囲な知識、技能・技術が求められ、数学、各種力学、機械設計、コンピュータ、有限要素法理論、各種加工法等に精通していることが要求される。

当大学校においてはCAEを自在に使いこなす人材を育成することを目指し、実際の物理現象を有限要素法解析の数値モデルへの置き換えから、適切な解析結果の評価とその対処を行うことができる技術者を育成するカリキュラムを計画・実施している。また、「思考・創造」をキーワードとして学生自身が考え答えを導き出す、思考型・設計型・開発型の授業を行い、その手助けを行うツールとしてCAEを活用している。

本報では、CAEを用いた「思考・創造」型のものづくり教育として実施した、カリキュラム内容および使用機器に関して報告する。

## II 使用機器

当大学の機械系で使用可能なコンピュータシステムには、ワークステーションとパソコンの2つのタイプがある。有限要素法プログラムを使用するの、大規模構造解析（要素、節点数が多い）においては、マシンの性能により計算時間・安定性に格段の違いがでてきてしまう。特に仮想メモリの扱いが、パソコン（Windows NT）に比べて、ワークステーション（UNIX）の方が格段にすぐれており、解析計算時の安定性の面で信頼がおけるものとなっている。

一方、時代の流れは、「ダウンサイジング」ということで、パソコンが主流となっている。学生を対象にしたCAEの修得を目的とした授業では、マンマシンインターフェースに優れたパソコン環境を使用し、学生がCAEソフトウェアの操作の大海で溺れることが無いように気をつける。表1に使用したシステム構成を示す。

表1 システム構成

★ハードウェア	
本体	HP VectraVL6/333
メモリ	128MB
ハードディスク	内蔵8GB
モニター	21インチ
★ソフトウェア	
OS	Windows NT Ver4.00
CAD/CAE	I-DEAS MS6

## III カリキュラム内容

授業を進めるにあたり注意すべきことは、カリキュラムの内容が単なるコンピュータオペレーションの修得だけで終わることがあってはならないことである。そのため、CAEによる構造解析と共に、実際に実験を行い、解析結果と実験結果を比較・検証・考察できる機会を設けている。

授業の前半部は、解析およびCAEに慣れ親しむことから始める。解析の課題は、理論解が求まっており実験により容易に解の検証をできるもので、たとえ解析に誤りがあったとしてもすぐに発見し修正できるものとする。授業の後半部では、複雑3次元形状の解析を行い更に応用的な課題としてCAEを活用した最適

設計に取り組み、学生自身が形状を考え修正し創造できる能力を身につけることを目標に、段階的にレベルアップを図るものとしている。

次に、はりのたわみ量に関して検討する授業の前半部の内容と、授業の後半部で行う解析の応用課題である最適設計の内容について記載する。

### 1. はりのたわみ量の理論解

ここでは、10種類のはりを用意しはりの両端部を支え、中央部に最大荷重14Nの負荷を与えたときの最大たわみ量を比較検討する。

7本のはりは、同一断面積（100mm<sup>2</sup>）ではあるが断面形状の異なるものを使用し、断面2次モーメントの違いによる剛性の違いを理解させる。また、残りの3本のはりでは、同一断面形状（72mm<sup>2</sup>）ではあるが、異なる材質からできているものを使用し、材料の種類の違いによる剛性の違いを理解させることを目的とする。

断面形状が同一である3種類のはりの材質は、一般構造用鋼のSS410（ヤング率：206GPa）と銅（ヤング率：108GPa）と黄銅（ヤング率：96GPa）を用いる。図1には、はりの断面形状を示す。

はりのたわみ量を求める理論等は、機械システム系の学生は既に材料力学、基礎工学実験を通し学んでおり、ここでは、下記の式(1)によりたわみ量を電卓等で計算し求める事ができる。

$$U = \frac{WL^3}{48EI} \times 10^3 \quad (1)$$

U：たわみ量 [mm<sup>3</sup>] W：荷重 [N]

L：はりの長さ [mm] E：ヤング率 [GPa]

I：断面2次モーメント [mm<sup>4</sup>]

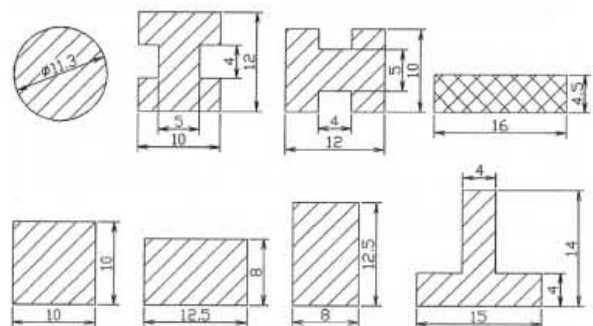


図1 はりの断面形状

## 2. はりのたわみ量測定実験

はりのたわみ量測定実験では、図2のユーイング装置を使用する。最小目盛りが1/1000mmのピックテストで、はりの中央部のたわみ量を測定する。

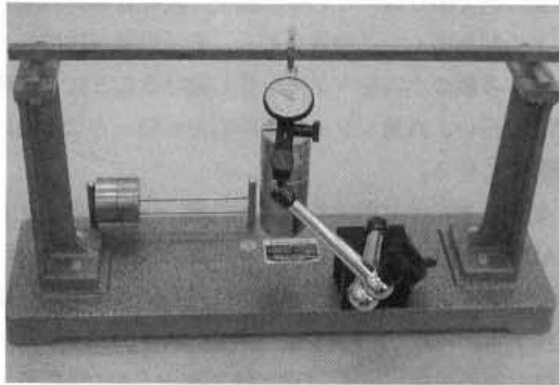


図2 ユーイング装置

## 3. はりのCAEによる構造解析

はりのCAEによる構造解析では、線形構造解析ソフトウェアのI-DEASを用いる。I-DEASは、米国SDRC社で開発され、設計、解析、テスト、製造、製図の機能を備えたCAD/CAM/CAEソフトウェアである。モデラー、プリ・ポストプロセッサ、ソルバーを一体化した統合型CAEアプリケーションであり、モデラーで作成した形状モデルを解析モデルとして直接利用できるなど、形状モデルの作成から、解析計算、結果の表示まで、同一データベースとして取り扱え連想性をもつ。設計変更に伴う形状モデルの修正・変更が解析モデルにも速やかに反映され、モデル形状の変更に従って、自動的に有限要素を作成し直してくれるなどの優れた面がある。図3には、解析結果のたわみ量を、ポストプロセッサにより表示したものを示す。また、表2には断面形状別の最大たわみ量を示す。

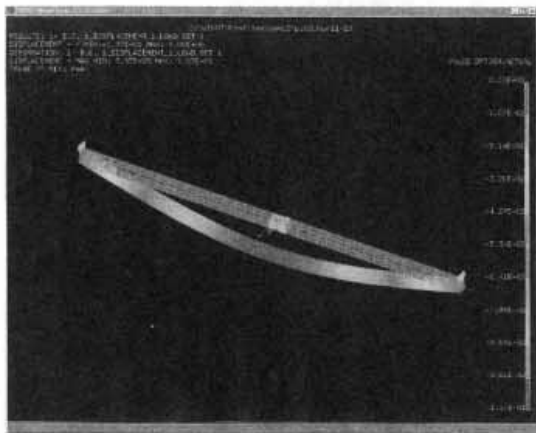


図3 CAEによるはりのたわみ量の解析結果

表2 断面形状別の最大たわみ量

形状	ヤング率 (材質) [GPa]	断面二次 モーメント [mm <sup>4</sup> ]	最大たわみ量		
			理論値 [mm]	実験値 [mm]	解析結果 [mm]
	206 (鋼)	833.33	0.106	0.092	0.107
	206 (鋼)	533.33	0.166	0.151	0.167
	206 (鋼)	1302.08	0.068	0.065	0.068
	206 (鋼)	1589.33	0.055	0.055	0.046
	206 (鋼)	799.95	0.111	—	0.112
	206 (鋼)	1413.33	0.062	0.062	0.063
	206 (鋼)	708.33	0.125	0.091	0.126
	206 (鋼) 0.3	121.50	0.731	0.780	0.732
	108 (銅) 0.33	121.50	1.397	1.350	1.400
	96 (黄銅) 0.35	121.50	1.568	1.490	1.570

## 4. 解析の応用課題&最適設計

解析の応用課題では、複雑な形状をしており電卓等の手計算では難しいものに挑戦する。また最適形状設計の課題では、変更前の形状と変更後の形状との強度の計測実験を行うため、レーザー加工、CAD/CAM、機械設計等の知識、技能・技術が必要になり、解析技術と合わせた複合的・総合的な機械技術の習得を目標としている。

図4は、応用課題の一例で組立式ラックに付属してくる六角レンチを模擬している。この形状を元にし、より軽く、より強度が勝る六角レンチの設計を行う。図5, 6, 7には、受講者が上記の課題に取り組み、設計した例を示す。CAEを使用し前条件を満たす形状を、数回の解析・検討を行った後、決定に至ったものである。

元になっている六角レンチの、応力の比較的小さい部分の材料を削り取り軽量化を計り、応力の高い部分については、反対に材料を余分に付けることより、強度を増している。

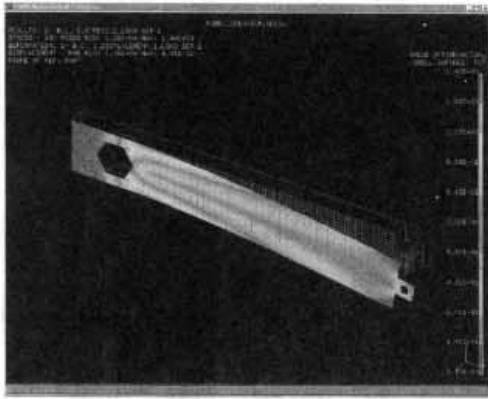


図4 問題モデルの解析結果

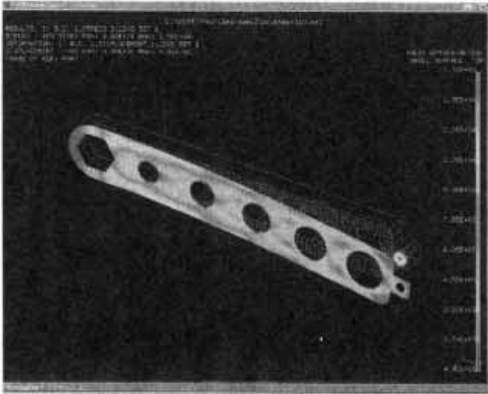


図5 モデルAの解析結果

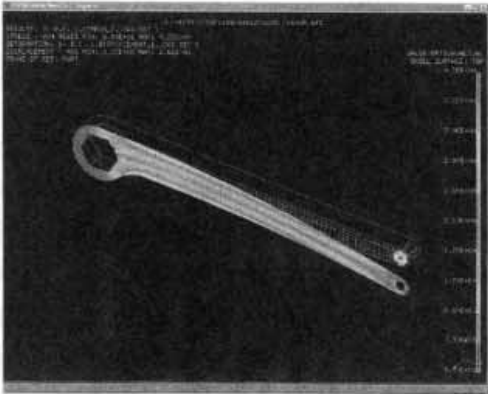


図6 モデルBの解析結果

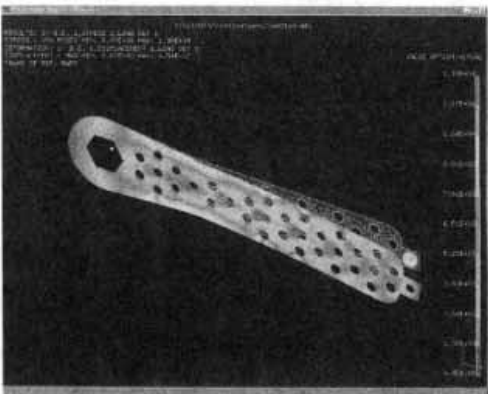


図7 モデルCの解析結果

図5の設計者は、六角ボルトの締め付け穴からハンドル操作部分へ向けて、穴の直径を徐々に大きいものに変化させながら強度を維持し軽量化を図っている。

図6の設計者は同様の考えで、ハンドル操作部分の外側の肉を削り取っている。図7の設計者は、六角レンチの幅を広くして強度を増し、その重量が増加した分を、多数の小穴をパターン化し設けることにより軽量化を行い、六角レンチ全体の応力が均一となる様に設計している。

解析結果により形状を決定した後、CAEデータをCAD/CAMに受け渡す。このデータの受け渡しには、中間ファイルフォーマットを使用して行われるのが一般的である。中間ファイルフォーマットには、DXF, IGES, STEP等の規格がある。DXFは2次元CAD間で多く使用されるデータ交換方式で、3次元CAD/CAM間では、IGES, STEPが多く使用されている。今回のCAEとCAD間のデータ交換では、CAEが「I-DEAS」であり、CAD/CAMが「Unigraphics」であるので、3次元CADデータ交換方式の、IGESフォーマットを使用する。

Unigraphicsの持つCAD/CAM機能を利用して、レーザー加工機で六角レンチを切断し、製作するためのプログラムを作成する。通常、CAD/CAMで作成されるデータは、CLデータと呼ばれ、刃物（工具・カッター）が移動する経路が計算され出力される。使用する工具の直径、長さ、加工開始・終了位置、切り込み方法、回避動作等を設定する事により、コンピュータがCLデータを計算する。図8には、求めたCLの経路を、図9には、CLデータの内容を示す。

上記の作成したCLデータのままで、通常のNC工作機械を動かし加工する事はできない。NC工作機械は、NCデータと呼ばれる動作命令により制御がなされており、工作機械特有の英数字からなるプログラム

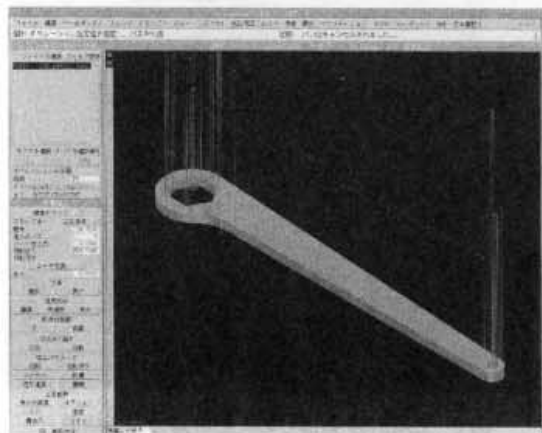


図8 CAD/CAM

```

TOOL_PATH/P1.TOOL.F1
TLDATA/MILL.1.0000,0.0000,75.0000,0.0000,0.0000
MSYS/-70.2240,-36.6360,0.0000,1.0000000,0.0000000,0.0000000,1.0000000,0.0000000
PAINT/PATH
PAINT/SPEED,9
PAINT/TOOL,FULL1
PAINT/COLOR,4
FROM/0.0000,0.0000,50.0000
SET/MODE,ABSOL
RAPID
GOTO/175.1472,9.4000,50.0000
RAPID
GOTO/175.1472,9.4000,2.5400
PAINT/COLOR,6
FEDRAT/MMPM,250.0000
GOTO/175.1472,9.4000,0.0000
PAINT/COLOR,3
GOTO/177.5000,9.4000,0.0000
CIRCLE/175.0000,9.4000,0.0000,0.0000000,0.0000000,-1.0000000,2.5000,0.0600,0.5000,1.0000,0.0000
GOTO/172.6020,10.1070,0.0000
CIRCLE/175.0000,9.4000,0.0000,0.0000000,0.0000000,-1.0000000,2.5000,0.0600,0.5000,1.0000,0.0000
GOTO/177.2115,8.2342,0.0000
GOTO/177.4342,8.8302,0.0000
GOTO/177.5000,9.4000,0.0000
GOTO/175.1472,9.4000,0.0000
PAINT/COLOR,4
RAPID
GOTO/175.1472,9.4000,50.0000
RAPID
GOTO/5.4250,9.4000,50.0000
RAPID
GOTO/5.4250,9.4000,2.5400
PAINT/COLOR,6
GOTO/5.4250,9.4000,0.0000
PAINT/COLOR,3
GOTO/5.4250,18.8000,0.0000
GOTO/0.0000,18.8000,0.0000
GOTO/-5.4271,9.4000,0.0000
GOTO/0.0000,0.0000,0.0000
GOTO/10.8500,0.0000,0.0000
GOTO/16.2771,9.4000,0.0000
GOTO/10.8500,18.8000,0.0000
GOTO/5.4250,18.8000,0.0000
GOTO/5.4250,9.4000,0.0000
PAINT/COLOR,4
RAPID
GOTO/5.4250,9.4000,50.0000
RAPID
GOTO/33.9748,-3.5424,50.0000
RAPID
GOTO/33.9748,-3.5424,2.5400
PAINT/COLOR,6
GOTO/33.9748,-3.5424,0.0000
PAINT/COLOR,3
GOTO/33.9748,4.5277,0.0000
CIRCLE/31.0871,-17.2966,0.0000,0.0000000,0.0000000,-1.0000000,22.0145,0.0600,0.5000,1.0000,0.0000
GOTO/15.0445,-2.2210,0.0000
CIRCLE/5.4030,9.2899,0.0000,0.0000000,0.0000000,1.0000000,15.0000,0.0600,0.5000,1.0000,0.0000
GOTO/-5.1111,19.9683,0.0000
CIRCLE/5.4030,9.2899,0.0000,0.0000000,0.0000000,1.0000000,15.0000,0.0600,0.5000,1.0000,0.0000
GOTO/5.4030,24.2699,0.0000
GOTO/175.2941,14.3870,0.0000
CIRCLE/175.0000,9.4000,0.0000,0.0000000,0.0000000,1.0000000,4.9957,0.0600,0.5000,1.0000,0.0000
GOTO/175.0000,4.4043,0.0000
GOTO/33.9748,4.5277,0.0000
GOTO/33.9748,-3.5424,0.0000
PAINT/COLOR,1
RAPID
GOTO/33.9748,-3.5424,50.0000
RAPID
GOTO/0.0000,0.0000,50.0000
PAINT/SPEED,10
PAINT/TOOL,NOMORE
END-OF-PATH

```

図9 CLデータ

言語を使用する。このため、上記のCAD/CAMで作成したCLデータをNCデータに変換する必要があり、これには、NCデータ変換プログラムを使用する。このとき特に注意しなければならないことがあり、変換されたNCデータが完全なプログラムではなく、機械が動作中に命令不足により停止、もしくは、意図しない動作を行うものになっている場合があることである。そのため、変換されたNCデータは、人手により不備・不足が無いか確認し、プログラムの追加、修正を行わなければならない。

図10にNCデータ変換した後、人手により追加・編集し完成したNCデータを示す。このデータは完全なものであり、レーザー加工機に読み込ませることにより加工を行う事ができる。

```

%
G92X0.Y0.Z50.
M61
F1500
G00G90X104.923Y-27.236
Z15.
G01Z0.
B45
X107.276
G03G17X102.378Y-26.529I-2.5J0.
X106.988Y-28.402I2.398J-0.707
G01X107.21Y-27.806
X107.276Y-27.236
X104.923
B300
G00Z50.
X-64.799
Z15.
G01Z0.
B45
Y-17.836
X-70.224
X-75.651Y-27.236
X-70.224Y-36.636
X-59.374
X-53.947Y-27.236
X-59.374Y-17.836
X-64.799
Y-27.236
B300
G00Z50.
X-36.249Y-40.178
Z15.
G01Z0.
B45
Y-32.108
G03X-55.18Y-38.857I-2.888J-21.825
G02X-75.335Y-16.668I-9.641J11.491
X-64.821Y-12.366I10.514J-10.698
G01X105.07Y-22.249
G02X104.776Y-32.232I-0.294J-4.987
G01X-36.249Y-32.108
Y-40.178
B300
G00Z50.
X-70.224Y-36.636
M62
M30
%

```

図10 NCデータ

図10のNCデータを見てみると、プログラムが英数字からできていることが解るが、このようなプログラムを工作機械が正常に動作する事を確認することはとても骨の折れることである。NC工作機械は、例え「G」、「X」などの一文字が間違えていたとしても、全く動作しなく、間違えのある部分を見つけだし修正することに多くの時間を費やすことがしばしばある。そのため、効率的にNCデータの確認、修正を行うための、加工シミュレーションソフトウェアを使用し、プログラムされたデータが満足する動作を行うのかチェックを行う。

図11には、加工シミュレーションソフトウェアの「Vericut」を使用し、六角レンチが正常に加工できるNCプログラムが、作成されたかどうか確認を行った



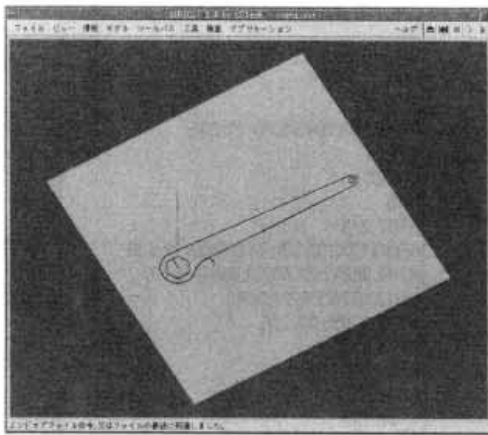


図11 NCデータのチェック

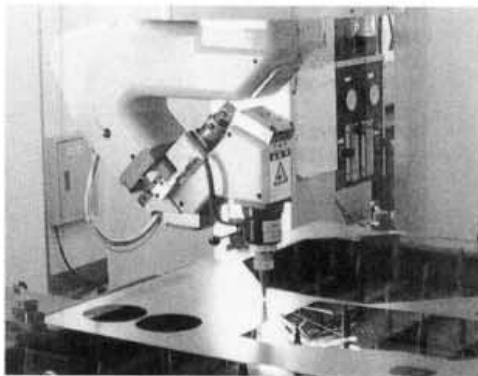


図12 レーザー加工

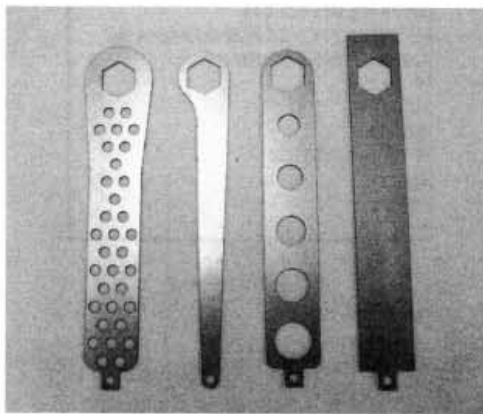


図13 製作した六角レンチ

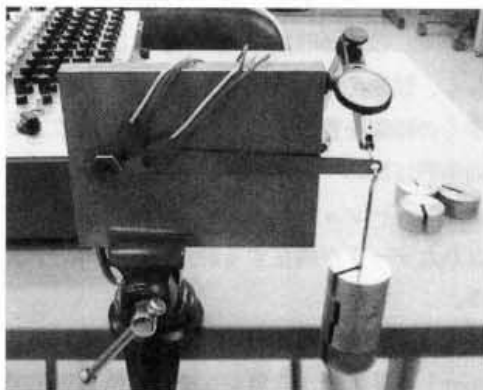


図14 六角レンチの応力・ひずみ測定実験

様子を示す。コンピュータ上でレーザー加工のシミュレーションを行っており、たとえNCプログラム中に誤りがあったとしても、作業者に危険がおよぶ事無く、工作機械を破損する事無く、安全で、短時間で効率的にプログラムの修正、追加、変更が可能となる。使用するレーザービームの幅と加工する材料の材質とサイズ、工作機械の制御装置に関する情報、チェックするプログラム名を設定した後、プログラムの確認を行う。

NCプログラムのチェックを終え、データに間違いがないことを確認した後レーザー加工機を使用し六角レンチの加工作業を行う。図12に、レーザー加工の様子を示す。レーザー加工機は、最高出力1200Wの炭酸ガスレーザー加工機を使用する。最大板厚6mmの軟鋼板、最大板厚2mmのアルミ板、最大板厚3mmのステンレス鋼板、アクリル板等の切断加工が可能である。今回の実験では、板厚1mmの軟鋼板を使用する。軟鋼板はレーザー加工を行うに於いて、取り扱いが最も容易であり安価であり、また安全に作業を進めることが可能な材料である。その理由としては、軟鋼板はレーザー光の反射を押さえ、反射光による事故を抑えることが可能であるためである。非加工材の材質が、金、銀、あるいは、金・銀メッキをした材料ではレーザー光を全反射してしまい加工が不可能である。また、アルミ板のレーザー加工では、加工条件によってはレーザー光を反射する可能性があるため、事故が起こる可能性が高くなり、加工の際には細心の注意を払わなければならない。

図13に、レーザー加工により製作した六角レンチを示す。図の右端の六角レンチを加工する所要時間は約40秒を要し、図の左端にある複数個の穴の空いたモデルでは、約200秒の加工時間を要する。また、加工時間の他に材料のセッティング、NCプログラムの登録の作業が必要であり、4本の六角レンチのレーザー加工作業全体では約1時間を要する。

図14は、六角レンチの応力・ひずみ測定実験の様子を示す。実験方法は、六角穴の空いた部分を固定し、六角レンチの回転を止め、ハンドル部に空けた荷重負荷用の小穴に、1個2Nの重りを7個までの合計で14Nの荷重を負荷する。

ひずみ測定では、測定物の形状が複雑なため、主ひずみの方向が未知のため、通常のひずみゲージでは測定が不可能である。そのため、3軸のロゼットゲージを接着し、測定したひずみ値から計算により、最大主ひずみ、最小主ひずみ、最大主ひずみ方向、最大せん断ひずみ、最大主応力、最小主応力、最大せん断応力、

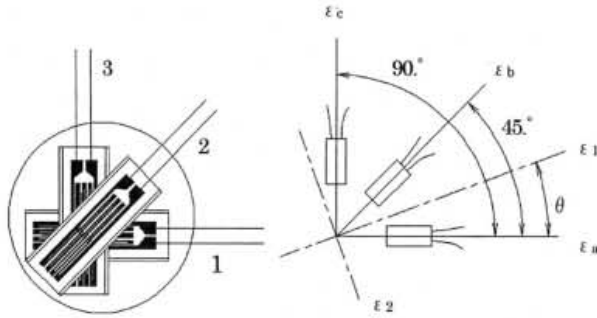


図15 3軸ロゼットゲージ

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2} \left[ \varepsilon_a + \varepsilon_c + \sqrt{2 \left\{ (\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2 \right\}} \right] \quad (2)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{2} \left[ \varepsilon_a + \varepsilon_c - \sqrt{2 \left\{ (\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2 \right\}} \right] \quad (3)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[ \frac{2\varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c}{\varepsilon_a - \varepsilon_c} \right] \quad (\varepsilon_a \text{ 軸から}) \quad (4)$$

$$\gamma_{\max} = \sqrt{2 \left\{ (\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2 \right\}} \quad (5)$$

$$\sigma_1 = \frac{1}{2(1-\nu)} \left[ (1+\nu)(\varepsilon_a + \varepsilon_c) + (1-\nu) \times 2 \sqrt{\left\{ (\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2 \right\}} \right] \quad (6)$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{2(1-\nu)} \left[ (1+\nu)(\varepsilon_a + \varepsilon_c) - (1-\nu) \times 2 \sqrt{\left\{ (\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2 \right\}} \right] \quad (7)$$

$$\tau_{\max} = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{\max} \quad (8)$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right\}} \quad (9)$$

ただし  $\nu$  : ポアソン比

$E$  : ヤング率

相当応力等を求める。図15には、3軸のロゼットゲージを示す。また、最大主ひずみを式(2)に、最小主ひずみを式(3)に、最大主ひずみ方向を式(4)に、最大せん断ひずみを式(5)に、最大主応力を式(6)に、最小主応力を式(7)に、最大せん断応力を式(8)に、相当応力を式(9)に示す。

ここで注意すべき問題点は、ひずみゲージを用いた測定では、六角レンチの限られた部分のひずみしか測定できないことがある。そのため、これを補うためにひずみの測定と同時に、六角レンチが荷重を受けたことにより生じる変形量をも測定を行う。一目盛り1/1000mmのピックテスタを用い、ハンドル部の右端に測定子をセットしたわみ量を測定する。

## IV おわりに

本報では、CAEを用いた「思考・創造」型のものづくり教育として実施した、カリキュラム内容および使用機器に関して報告した。

CAEを活用し、「思考・創造」をキーワードとしてカリキュラムを計画・実施しこれにより、学生自身が考え答えを導き出す、思考型・設計型・開発型の授業展開を目指すものであり、その手助けを行うツールとしてCAEを活用するものである。

授業は、上記の狙い通りに授業を進めることができた。CAEを活用することにより、学生自らが、自身の設計の妥当性をコンピュータ上でシミュレーションを行うことにより、あらかじめ想定した状況もしくは、時として全く想定していない状況をも確認でき、複数の異なる設計を考え、比較検討することができた。これまで設計を行うのに行わなければならなかった技術計算をCAEが肩代わりしてくれることにより、技術計算を行っていた時間を、考える時間に割当てることにより、より深い設計、思考を行うことが可能になった。また、CAEでの構造解析結果と実際の実物実験との比較・検証を併せて行うことにより、単なるコンピュータ操作方法の習得に終わらせることなく、CAEでの解析結果を机上の空論に終わらせることが無いカリキュラム内容とすることができた。

更に、CAEを使用することにより、コンピュータ上で複数の異なる計算機実験を行うことが可能なため、多数の試作品を作製し実験を行うことが無くなるため、わずかな費用と時間で、安全に授業を進めるとができるなど、多大な効果を上げることができた。

### 【参考文献】

- (1) 能力開発研究センター、技能と技術 3/2000線形・非線形構造解析、雇用問題研究会
- (2) 川井忠彦、機械技術者のための有限要素法入門、オーム社
- (3) 機械技術者のための3次元CAD、CAE導入・活用ガイド、日刊工業新聞社
- (4) 矢野元基・吉村忍、有限要素法、培風館
- (5) 西村 尚、ポイントを学ぶ材料力学、丸善株式会社
- (6) (株)共和電業、KYOWA STRAIN GAGES カタログ