

線形・非線形構造解析

— ABAQUS編（鍛造加工シミュレーション） —

北陸ポリテクカレッジ 生産技術科 増川 一郎
 (北陸職業能力開発大学校)

1. はじめに

従来、有限要素法による構造解析といえば、線形静解析有限要素法ソフトウェアを用いた、応力やひずみの状態を計算によって求めることを意味していた。しかし、最近の構造解析は、塑性加工や自動車の衝突のように、高度な非線形問題にも広く用いられるようになってきた。

汎用非線形構造解析プログラムには、ABAQUS, MARC, ANSYS, ADINA等の優れたプログラムが数多く存在する。非線形構造解析においては、幾何学的非線形、材料非線形、接触非線形などの非線形現象が生じるほか、運動の記述、材料モデルの扱い、境界値問題などのさまざまな乗り越えねばならない難問がある。

本報では、ABAQUSを使用しての鍛造加工シミュレーションの事例を紹介するとともに、非線形構造解析の特徴、解析機能、解析条件の設定ポイント、今後の課題等について報告する。

2. 陰解法と陽解法

近似解法は、応力の釣り合い方程式を離散化の基礎とする（準）静的な解法と、運動方程式を離散化の基礎とする動的な解法に分類される。

静的な解法は、各増分ステップを反復法（iterative method）により解く陰解法（implicit scheme）と、1回の線形計算で求める陽解法

（explicit scheme）に分類され、現存する弾塑性有限要素法プログラムは、静的陰解法、静的陽解法、動的陽解法の3つに分けられる。

静的陰解法は、応力の釣り合い方程式を基礎式とし1回の増分ステップを大きくとる特徴がある。各増分ステップにおける問題は非線形問題となり、これをNewton-Raphson法のような反復処理で解く。

各増分ステップはいくつかの収束計算から成り立っており、内力と外力の差の残差力を評価し、収束解が得られたかどうか判断する。しかし、この収束計算においては、時として反復処理が収束しなくなる場合があり、特に接触問題を扱う場合には注意が必要である。

表1には、非線形計算における陰解法と陽解法の特徴をまとめる。

表1 陰解法と陽解法の比較

比較項目	陰解法	陽解法
適合分野	静的問題	動的問題
剛性マトリクスの組立	要	不要
逆行列の計算	あり	なし
時間増分サイズ	大きい	小さい
収束計算長	あり	なし
短所	<ul style="list-style-type: none"> ・計算精度の保証有り ・ステップ数が少ない 	<ul style="list-style-type: none"> ・計算速度が早い ・ベクトル化が容易
長所	<ul style="list-style-type: none"> ・計算速度が遅い ・収束しない場合がある 	<ul style="list-style-type: none"> ・ステップ数が多い

3. ABAQUSの特徴

ABAQUSは、汎用の非線形構造解析プログラムである。ABAQUS/Standard（静的陰解法）とABAQUS/Explicit（動的陽解法）の2種類のプログラムが存在する。静的陰解法での剛性方程式を式①に、また動的陽解法での運動方程式を式②に示す。

$$[k]\{u\} = \{F(t)\} \quad \dots \text{①}$$

$$[m]\{\ddot{u}\} + [c]\{\dot{u}\} + [k]\{u\} = \{F(t)\} \quad \dots \text{②}$$

[m] : 質量マトリクス

[c] : 減衰マトリクス

[k] : 剛性マトリクス

{u} : 変位ベクトル

{ \dot{u} } : 速度ベクトル

{ \ddot{u} } : 加速度ベクトル

{F(t)} : 力ベクトル

ABAQUSは、自動車、航空宇宙、造船、金型加工、土木建築、ゴム製品、スポーツ用品等のさまざまな分野を対象としており、線形/非線形静解析はもちろんのこと、線形/非線形過渡応答解析、固有値解析、座屈解析、定常/非定常伝熱解析、音響解析、圧電解析等のさまざまな解析が可能である。

しかしその反面、汎用であるがゆえそれを使いこなすことが大変難しく、解析パラメータの設定、接触の定義、材料物性値の定義、計算ステップの定義等さまざまな乗り越えなくてはならない難問がある。これらの入力の設定に不備・不具合がある場合、計算の途中でプログラムがエラーを起こしてしまい解析がストップしてしまう。また、解析計算がエラーなく終了したからといって安心はできなく、上記の設定で誤りがある場合は、正確な解析計算結果を得ることができない。例えば、材料物性値の値を例にするならば、素材のヤング率の単位を間違えてしまったときなどは、実際の挙動とはかけ離れた計算結果となってしまう。

4. 使用機器

今日、コンピュータの基本ソフトウェアであるOSは、圧倒的なシェアをMS-WINDOWSが占めている。コンピュータの初心者でも簡単に操作できることを目的とし優れたユーザインターフェースを備えている。一方、インターネット上でプログラムを公開し無償で配布されているLinuxなどのOSが、サーバの分野を中心に急拡大している。このような状況のなか、LinuxやFreeBSDなどに見られるUNIX環境を好むパワーユーザも数多く、西暦2000年にはLinuxが大幅に普及し、多数の書籍がそれを取り上げている。

これまでは商用のUNIX環境で稼働していた構造解析ソフトウェアのなかからも、Linux対応をうたい文句とするものまで現れている。非線形構造解析などの大規模な計算を実行するときは、仮想メモリの取り扱いや、解析計算時の安定性・信頼性の面で、現在もワークステーション（UNIX）の使用が好まれる。表2に鍛造加工シミュレーションの各作業に対するソフトウェア、およびハードウェアを示す。

表2 解析実行環境

ハードウェア	
本体	HP9000/C200
SPEC int95	: 14.3
SPEC fp95	: 21.4
メモリ	: 128MB
ハードディスク	: 内蔵SCSI9GB 外付SCSI4GB
モニタ	: 21インチ
グラフィクス	: OpenGL
ソフトウェア	
OS	: HP-UX 10.20
モデラー	: I-DEAS ms6
プリプロセッサ	: I-DEAS ms6
ソルバー	: ABAQUS Ver5.8
ポストプロセッサ	: I-DEAS ms6

5. 解析問題

鍛造加工シミュレーションの問題は、穴空き円柱ビレットの据え込みを例とする。

図1に試験片の形状を示す。長さ30mm、外径30mmの円柱の中心に直径10mmの穴が空いている。材料モデルは代表的な鋼を想定する。表3に設定した材料物性値を示す。また、材料の塑性の定義では、真応力と対数ひずみで加工硬化曲線の設定を行う。このとき、硬化挙動を定義するには、全ひずみではなく塑性ひずみを用いる。表4および図3に設定した材料塑性の定義を示す。

この穴空き円柱ビレットを、平らな剛なパンチとダイの間で自由鍛造を行い、ビレットを圧縮し長さを2/3減少させる。図2に鍛造加工で使用する工具形状を示す。表5には工具寸法・工具材質・加工条件を示す。また、穴空き円柱ビレット上面および側面と剛な工具との間には接触による摩擦が発生する。

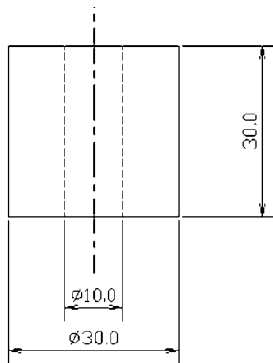


図1 試験片

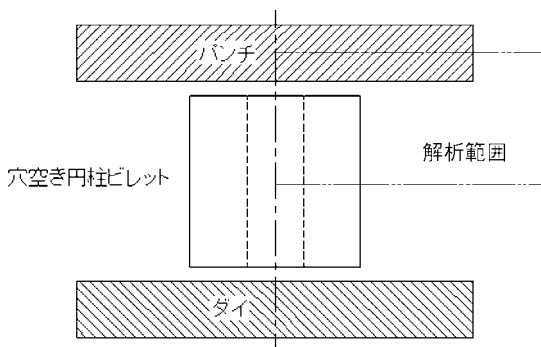


図2 工具形状

表3 材料物性値1

外径 [mm]	30.0
穴径 [mm]	10.0
高さ [mm]	30.0
ヤング率 [GPa]	210
ポアソン比	0.3
密度 [kg/mm ³]	7.8×10^{-6}
熱膨張係数 [1/°C]	1.2×10^{-5}
比熱 [J/(kg·°C)]	586
熱伝導率 [J/(m·s·°C)]	52
ひずみ速度依存性	無し

表4 材料物性値2

対数塑性ひずみ	真応力 [MPa]
0	250
0.1	300
0.2	330
0.4	400
1	580

対数塑性ひずみ-真応力

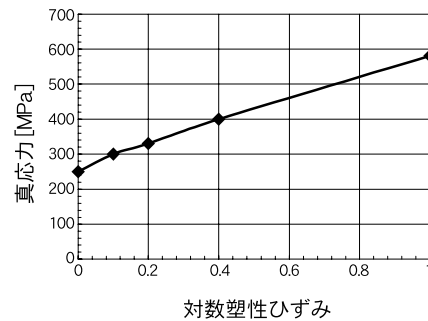


図3 加工硬化曲線

表5 工具寸法・工具材質・加工条件

〈工具寸法〉	
パンチ	□50.0mm ± 0.1mm
ダイ	□50.0mm ± 0.1mm
〈工具材質〉	
硬さ	HRC 60
表面荒さ	Ra = 0.5 μm
〈加工条件〉	
据え込み量	20mm
摩擦係数	0.05

6. 解析の詳細

6.1 解析の流れ

解析の作業では3種類のソフトウェアを駆使し作業を行う。図4に解析作業の流れを示す。

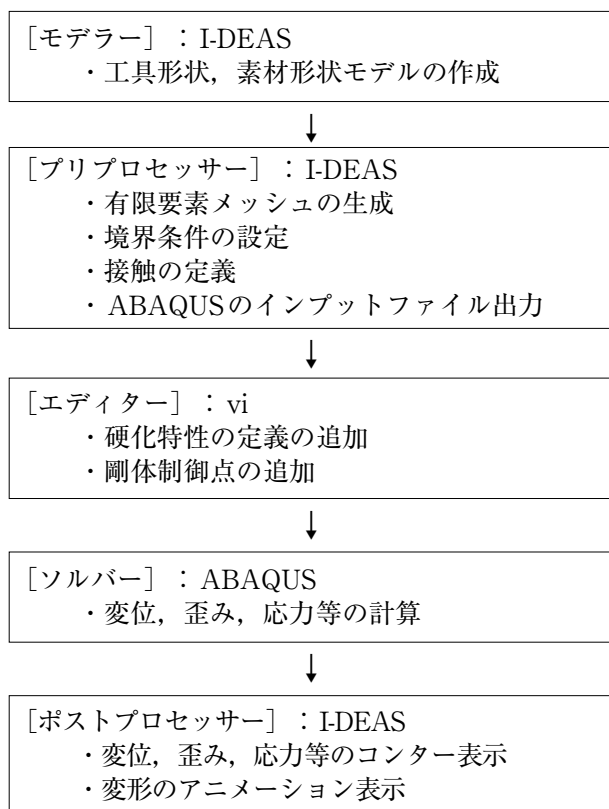


図4 解析作業の流れ

6.2 モデラーでの詳細

工具形状と試験片形状は、3次元CADのI-DEASを使用して作成する。I-DEASは優れたユーザーインターフェースを備え操作性がよく、今回の解析モデルのような単純な形状を作成するために要する時間は10分間もあれば十分である。2次元の断面形状を作成後、それを回転させることにより試験片形状をソリッドモデル、工具をサーフェスモデルとして作成する。

6.3 プリプロセッサでの詳細

(1) 有限要素メッシュの生成

解析精度は、有限要素法モデルに含まれる要素、節点の数に比例し向上する。その反面、解析に費やされる時間とメモリ容量の解析コストが増大する。この解析コストを抑える目的のため、形状が対称な場合、モデル全体を解析範囲とするのではなく、解析計算の範囲をモデルの一部だけとすることが可能である。これにより、モデルの総自由度を減らしながら、全体モデルの解析と同等の結果を得ることができる。そこで、今回の事例のモデルでは、全体の1/8の部分だけに注目し解析範囲を定め、解析計算を実行する。

試験片の有限要素メッシュは、6面体ソリッド要素で、半径方向に15分割、高さ方向に10分割、円周方向に20分割とする。また、工具の有限要素メッシュは、要素長1mmの四角形シェル要素で分割を行う。

(2) 境界条件の設定

通常、シェル要素は1つの節点につき6つ自由度を持つ。XYZ方向の移動自由度(TX, TY, TZ)とXYZ軸回りの回転自由度(RX, RY, RZ)である。また、ソリッド要素は移動の自由度(TX, TY, TZ)のみを持つ。

有限要素法解析の特徴の1つとして、解析モデル中に含まれる節点の自由度を拘束し、剛体移動が発生しないようにしなければならない。

この剛体移動を防ぐためには、解析モデル全体のなかに含まれるいずれかの節点で、X,Y,Z方向の移動・回転の自由度を拘束し、モデル全体のXYZ方向の移動とXYZ方向の回転の拘束は必ず設定されていなければならない。

今回の解析モデルでは、1/8に分割した箇所に対し、対称境界条件を設定する。分割された対称境界での節点の変位・回転を拘束することにより、変位および回転の自由度を拘束し、対称境界上にある節点は、その面内のみ変位・回転することを許可する。解析するモデルが鏡で写したとき矛盾のない動きとなるように節点を拘束し、対称境界面上にある節点

群の自由度は、その面内でのみ変位、回転の拘束をフリーにする。

実際の鍛造加工では、工具により材料を圧縮することによって製品を作り出す。鍛造加工シミュレーションでは、工具を移動させるための工具制御点を設定する必要がある。工具制御点は、上記で作成した要素に属さない節点として作成する。通常の有限要素法解析では、解析モデル中にいずれかの要素に属さない節点を含んではならず、この要素に属さない節点のことをフリーノードと呼ぶ。

今回の鍛造加工シミュレーションでは、この節点に強制変位を設定し、工具が材料の変形抵抗にうち勝ち、試験片を2/3の長さに圧縮する動作を作り出す。有限要素法モデルが1/8であり、元の試験片形状の2/3に長さを圧縮するためには、強制変位量はY方向に10mm ($T_X=0$, $T_Y=-0.010$, $T_Z=0$, $R_X=0$, $R_Y=0$, $R_Z=0$) に設定する。

(3) 接触の設定

接触の定義では、工具と試験片の接触を起こす部分の設定を行う。試験片は工具との接触面より高い圧力を受け滑り摩擦を生じる。摩擦の扱いは摩擦応力が工具法線方向の垂直応力に比例するというクーロン則を適用する。

解析モデルでは、工具となる四角形シェル要素の法線方向（表面）が試験片の方向を向く必要がある。また、試験片の工具と接触する要素は、6面体ソリッド要素であるので要素に属する面の番号が重要となる。6面体ソリッド要素は、8個の節点と12本の辺と6枚の面を持つ。このうちのどの面が工具と接触を起こすか、加工開始時から終了時までの変形を想定し、接触を起こす可能性のある面に接触の設定を行う。

接触の処理において、工具に属する節点や辺、面は被加工材の要素に食い込むことができるが、被加工材に属する節点や辺、面は工具の要素内に食い込みがなくてはならない。

図5には、上記のすべての設定を行った穴空き円柱ビレットの鍛造加工シミュレーションで使用する有限要素法モデルを示す。

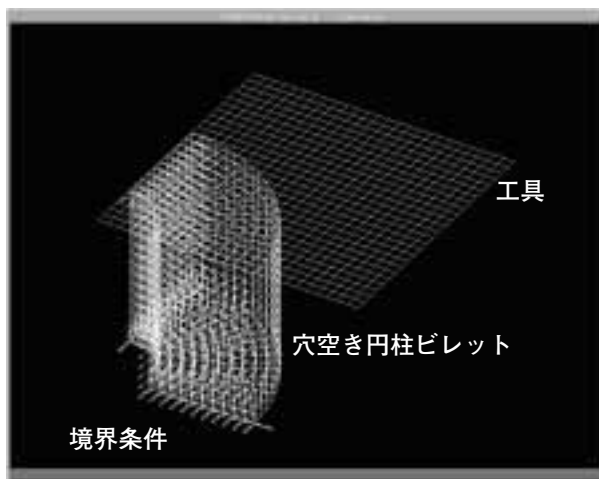


図5 有限要素法モデル

(4) ABAQUS用インプットファイルの出力

プリプロセッサで解析パラメータの設定を行った後、ABAQUSで解析計算を実行するために必要となるファイルを作成する。このファイルはインプットファイルと呼ばれ、ソルバーが計算を行うために必要な有限要素法の情報が書かれている。アスキーテキストファイル形式であり、エディタを使用し人手により編集することが可能である。図6にインプットファイルのアウトラインを示す。

〈モデルの定義〉

モデル形状…節点, 要素

要素特性の定義

材料データ…ヤング率, ポアソン比

材料塑性, 温度依存性

比熱, 熱伝導率, 密度

接触の定義

剛体の定義

境界条件…拘束条件, 強制変位

〈履歴の定義〉

プロシージャの定義…増分, 解析時間

荷重の定義

出力の定義…変位, 応力, ひずみ, 反力

図6 インプットファイルのアウトライン

6.4 解析計算

ABAQUSは、静的陰解法により非線形問題をNewton-Raphson法のような反復処理で解く。物体に生じる外力と内力の差の不釣り合い力を反復過程で解消することにより力学的正確さを持つ。しかし、鍛造加工の過程では工具と材料との接触状態が刻々と変化し、条件によってはこの過程で反復処理が収束しなくなり計算がストップしてしまうこともある。また、反復処理の途中で幾何学的な境界条件が変化してはならず、接触を扱う場合は、応力増分を確定する反復処理の前に接触に関する反復処理が必要になる。

図7に、ソルバーがインプットファイル进行处理し解析結果を出力するまでの流れを示す。解析を正常に行うためには、このインプットファイルに誤りが含まれていてはならない。解析計算を始める前にBathPREプロセッサによりファイルの内容がチェックされ、設定項目に誤りや過不足がないか確認を行う。この確認プロセスが正常に終了した後、ソルバーにより解析計算が始まる。

図8に、静的陰解法の特徴である反復処理の様子を示す。これは解析計算時におけるニュートン法での収束過程を示し、既知なる変位 u_1 と既知なる荷重 p_1 , p_2 より、未知なる変位 u_2 を求める。波線で示すように数回の収束計算により解を得る。

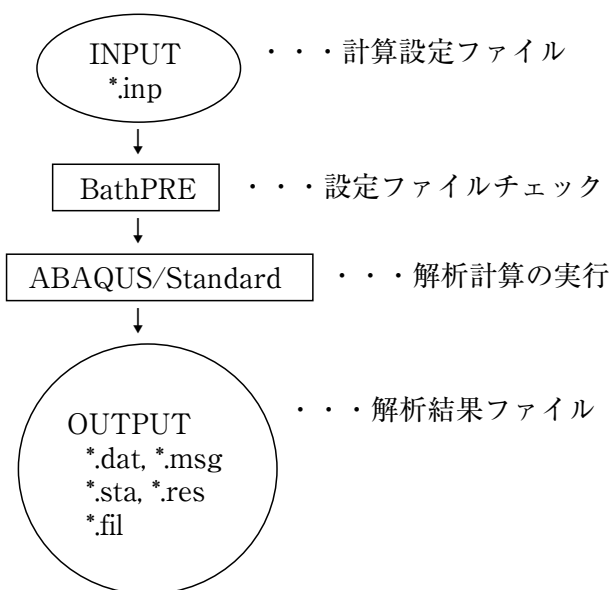


図7 ソルバーの処理

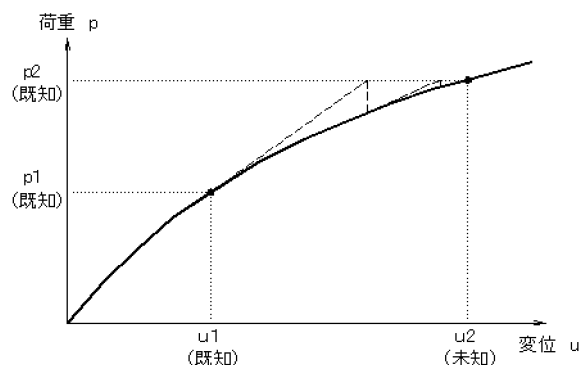


図8 ニュートン法での収束過程

6.5 解析結果

据え込みによる試験片の変形状態を図9に示す。摩擦により断面の変形は不均一な模様となり、境界面での摩擦が大きいため、工具に接触している部分の材料の移動量が小さくなり、試験片の側面部は樽形に膨らみ、穴上面および穴下面の直径は元の直径と比べてともに大きくなり、工具と試験片との摩擦による影響で下面の直径の方が上面部分より大きくなっている。

大変形を受けている中央部外側では、上端面や下端面より変形の進行が早く進み、周方向応力が引張り応力となるため割れが発生しやすくなる。そして、圧縮荷重により材料内に誘発される引張り応力を2次の引張り応力と呼ぶ。

図10は、据え込み最終段階での試験片の変形と塑性ひずみの状態を示したものである。塑性ひずみ

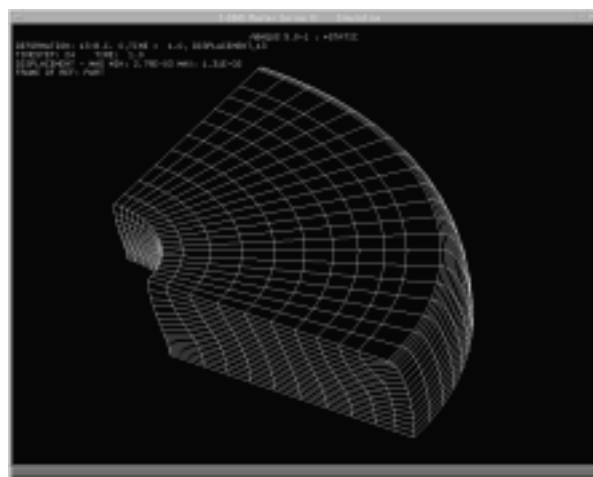


図9 変形状態

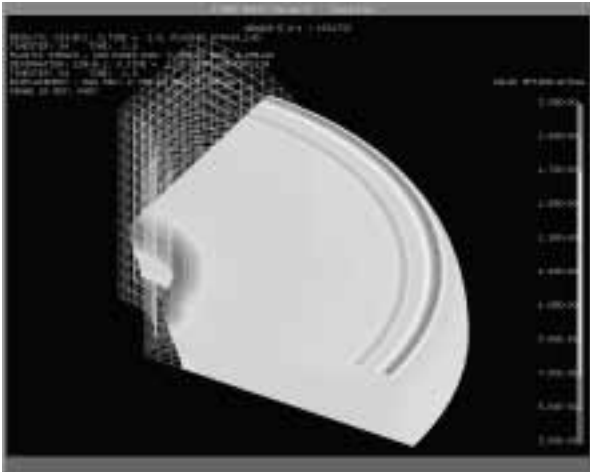


図10 塑性ひずみ

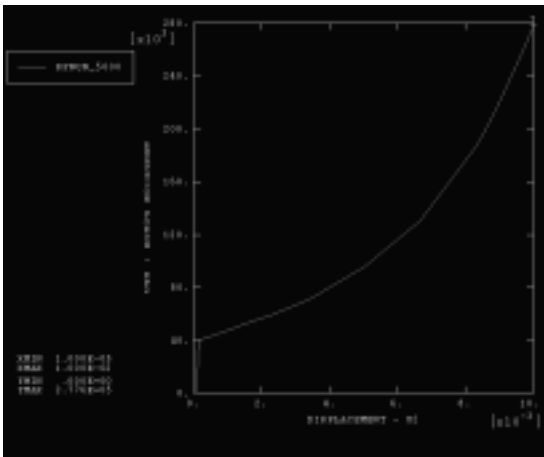


図11 変位と荷重の関係

は試験片が加工中に受ける全ひずみより弾性ひずみを差し引いたものであり、荷重を除荷した後の弾性回復現象を考慮したひずみの状態を表している。

図11は、工具の押し込み量と荷重の関係をグラフにしたものである。工具制御点のY方向の変位を横軸に、そしてその制御点に作用する節点反力を縦軸とした。鍛造加工時に必要な総荷重を求めることができるが、モデルを1/8に分割しているため実際にはこれを8倍する必要があることを忘れてはならない。

7. まとめ

本報では、ABAQUSを使用し、穴空き円柱ビレットの鍛造加工シミュレーションについて報告し

た。今回の解析例では、単純に一定の速度で加圧する鍛造加工の解析しか行っていない。加工速度の影響を考慮したひずみ速度依存性、塑性仕事による発熱を考慮した温度-変位連成解析、材料の空孔を考慮した多孔質金属の特性などを含むさらに難しい解析が後に控えている。

線形構造解析と比較して、解析を実行するために必要な入力設定すべき項目の数や内容が遥かに難しいものとなっている。また、出力される計算結果のデータ量は膨大であり、計算結果を評価し実際の設計に適用することはそれにも増して難しい作業になる。そして解析技術者には、有限要素法理論、コンピュータ環境、ソフトウェア、材料力学、塑性力学、各種加工法等の広範囲かつ専門的知識が必要となる。

このような厳しい状況のなか、高度な構造解析を担当する人材の確保、教育が大きな課題となっており、教育界は、この新しいテクノロジーを理解し使いこなせる学生を数多く送り出す使命を帯びている。

＜参考文献＞

- 1) HKS,INC : 「ABAQUS/Standard User's Manual」.
- 2) HKS,INC : 「ABAQUS/Standard Example Problems Manual」.
- 3) HKS,INC : 「ABAQUS Theory Manual」.
- 4) 富田佳宏 : 「弾塑性力学の基礎と応用」, 森北出版株式会社.
- 5) 日本塑性加工学会編 : 「非線形有限要素法」, コロナ社.
- 6) アイダエンジニアリング(株) : 「AIDA プレスハンドブック」.
- 7) 川並高雄ほか : 「基礎塑性加工学」, 森北出版.
- 8) (株) 日本総合研究所 : 「大変形構造解析コード JOH/NIKE」.
- 9) (株) 日本総合研究所 : 「非線形動的構造解析ソフトウェア JOH/DYNA」.