

線形・非線形構造解析

— AITAS2D編（プレスU曲げ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

近年、工学・技術の発展に伴い構造体や機械の設計、材料強度の研究では弾性限を超えた塑性変形までを含む場合が多くなってきた。

有限要素法による構造解析においても、いくつもの優れた汎用非線形有限要素法プログラムが発表されており、数値シミュレーション技術によりプレス加工における材料の成形過程までも解析し、設計・開発段階における有用なツールとして活用されようとしている。その反面、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り、真の道具として活用することは難しい。

本報では、AITAS2Dを使用して行ったプレスU

曲げ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. AITAS2Dの特徴

AITAS2Dは、非線形問題を静的陽解法により解く弾塑性有限要素法プログラムである。弾塑性有限要素法では、応力速度とひずみ速度（ストレッチング）との関係で定式化を行い、解くべき剛性方程式の形は剛性マトリクスが弾塑性係数と幾何学非線形項とから決定されること、未知数の変位、境界条件の節点力増分であることを除けば、弾性有限要素法の剛性方程式と同じ形をしている。

$$[K]\{\Delta u\} = \{\Delta f\} \quad (1)$$

ここで、 $[K]$ は剛性マトリクス、 $\{\Delta u\}$ は節点変位増分、 $\{\Delta f\}$ は節点力増分を表す。この剛性方程

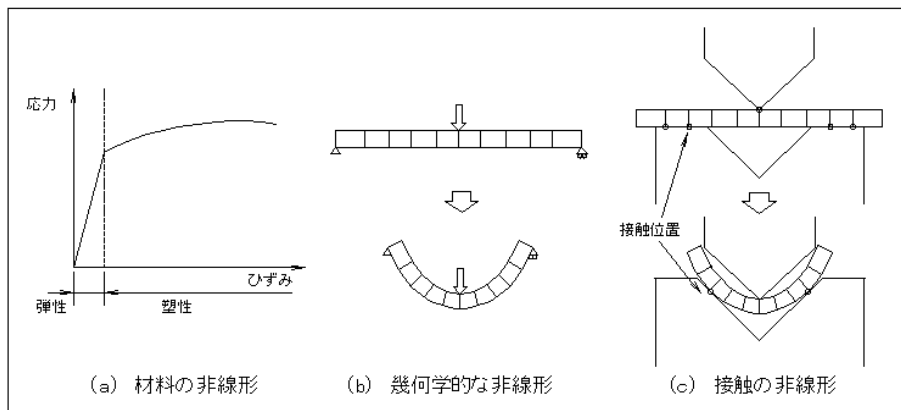


図1 3つの非線形

式を増分ステップごとに解いて、節点変位増分やそれから求まるひずみ増分、応力増分を加え合わせていく。この関係式が成り立つためには、時刻 t から $t + \Delta t$ の増分ステップ間に、節点力増分と変位増分との間に完全な線形関係が成立しなければならない。そのため、材料非線形、幾何学的非線形、接触非線形について上記の条件に満足するように導入されたものが r_{\min} 法である。

線形関係を破る項目の①弾性状態から塑性状態への移行： r_{ep} 、②ひずみ増分： r_{strain} 、③回転増分： r_{ω} 、④接触： r_c 、⑤離脱： r_u のチェックを行い、その中の一番小さい比 r を r_{\min} と置き、 r_{\min} で増分ステップをコントロールしたうえで増分値を加え、変位、節点の応力、相当ひずみなどを更新する。

静的解法を採用することにより力学的正確さを保証し、静的陰解法における反復処理で起こりうる発散の問題を、 r_{\min} 法と呼ばれるステップ増分量を制御する手法を用いることにより回避し、増分ステップを線形として扱えるようにしている。

材料非線形の扱いでは、Prandtl-Reussの弾塑性構成式を有限変形に適用した次式を用いる。

$$\dot{\tau}_{ij} = C_{ijkl}^{ep} D_{kl} \quad (2)$$

$$C_{ijkl}^{ep} = 2G \left[\delta_{ik} \delta_{jl} + \frac{\nu}{1-2\nu} \delta_{ij} \delta_{kl} - \frac{9G \sigma'_{ij} \sigma'_{kl}}{2\bar{\sigma}^2 (H' + 3G)} \right] \quad (3)$$

ここで、 $\dot{\tau}_{ij}$ は Kirchhoff 応力の Jaurman 導関数、 D_{ij} は弾塑性ひずみ速度、 ν はポアソン比、 G はせん断弾性係数、 $\bar{\sigma}$ は相当応力、 σ' は偏差応力、 H' は加工硬化曲線の勾配： $H' = dH/d\varepsilon^p$ 、 a は塑性状態のときは 1、弾性および除荷状態のときは 0、 δ_{ij} はクロネッカのデルタである。

また、加工硬化曲線は、次式の実応力と塑性ひずみの関係で表す n 乗硬化則を採用する (図 2)。

$$\sigma = A (\varepsilon_0 + \varepsilon^p)^n \quad (4)$$

ここで、 σ は実応力、 ε^p は塑性ひずみ、 A は加工硬化係数、 ε_0 はオフセットひずみ、 n は加工硬化指数である。

幾何学的な非線形の扱いでは、次に示す速度形仮

想仕事の原理式を離散化の基礎とする。

$$\int_V \{ (\dot{\tau}_{ij} - 2\sigma_{ik} D_{kj}) \delta D_{ij} + \sigma_{jk} L_{ik} \delta L_{ij} \} dV = \int_{S_i} \bar{t}_i \delta v_i dS + \int_V \bar{\rho} b_i \delta v_i dV \quad (5)$$

ここで、 τ_{ij} 、 σ_{ij} はそれぞれ Kirchhoff 応力、Cauchy 応力であり、 D_{ij} 、 L_{ij} はストレッチング・テンソル、速度勾配テンソルである。また \bar{t}_i 、 \bar{b}_i はそれぞれ物体に作用する表面力速度、物体力速度であり、 $\dot{\tau}_{ij}$ は Kirchhoff 応力の Jaurman 速度を表す。

接触の扱いでは、加工の進展に伴い接触の状態が刻々と変化するので、接触の判定と離脱の判定が必要になる。増分ステップを線形として取り扱うためには、1 増分ステップ内で境界条件が変化してはならない。また、剛体工具と材料との接触は、材料表面に位置する節点について判定を行い、幾何学的な条件で求めることができる。接触したと判定した節点には接触を表す境界条件を与え、接触していない節点では工具表面にちょうど達するような比 r を求

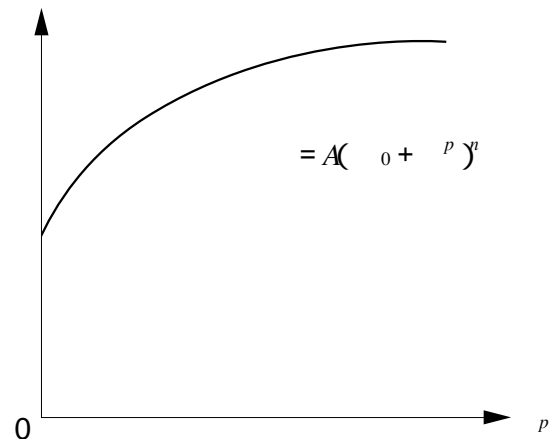


図 2 加工硬化曲線

表 1 静的陽解法の特徴

項目	静的陽解法
基礎式	釣り合い方程式
離散化表現	剛性方程式 (線形)
求解法	1 回の線形計算
増分サイズ	小さい (r_{\min} 法)
接触処理	困難
課題	r_{\min} が極めて小さくなることもある

める。工具からの離脱の判定は、力の条件により求めることができる。工具からの材料への反力が受けなくなったときに、節点が工具から離脱したことになり、工具と接触している節点について工具面に垂直な節点力が0となるような比 r を計算する。

表1には、AITAS2Dが採用している静的陽解法の特徴をまとめる。

3. 使用機器

非線形構造解析など大規模な構造計算では、計算時間やメモリなど、より多くのコンピュータ資源を必要とする。一方、構造解析に要する計算時間の短縮や解析精度の向上の要求はますます厳しくなり、解析計算時の安定性・信頼性も同様に要求されている。

表2には、プレスU曲げ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。

4. 解析問題

解析の問題は、プレス加工のU曲げ加工を例とする。薄板のプレス加工時に発生する問題として、①材料の持つ弾性回復現象により曲げ角度が戻ってしまうスプリングバックによる精度不良、②曲げ加工を受けたR部に亀裂が入る曲げ割れ、③板材の裏表で応力状態が異なることにより発生するそり、などがあげられる。

図3に作成する製品形状を示す。製品の幅は15mm、高さは10mm、奥行きは30mmで、曲げ部にR2mmの丸みを持つ。

製品断面より加工前のシート(板)の大きさは、32.065mm(幅)×30mm(奥行き)×0.5mm(板厚)のサイズとする。板幅のサ

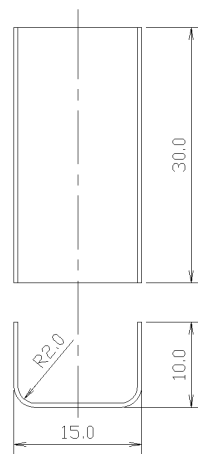


図3 製品形状

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	Modeler
プリプロセッサ	Modeler
ソルバー	AITAS2D
ポストプロセッサ	Viewer

イズは、通常の曲げ加工では、板の内側(パンチに面する側)では圧縮力が作用するため縮み、板の外側(ダイに面する側)では、反対に引張り力が作用するため伸びる現象を起こす。したがって、板厚の中心部には伸びも縮みもしない部分の中立軸が存在し、加工前のシートの大きさは、中立軸の長さより求めることができる。

図4には、U曲げ加工で使用する金型形状を示す。

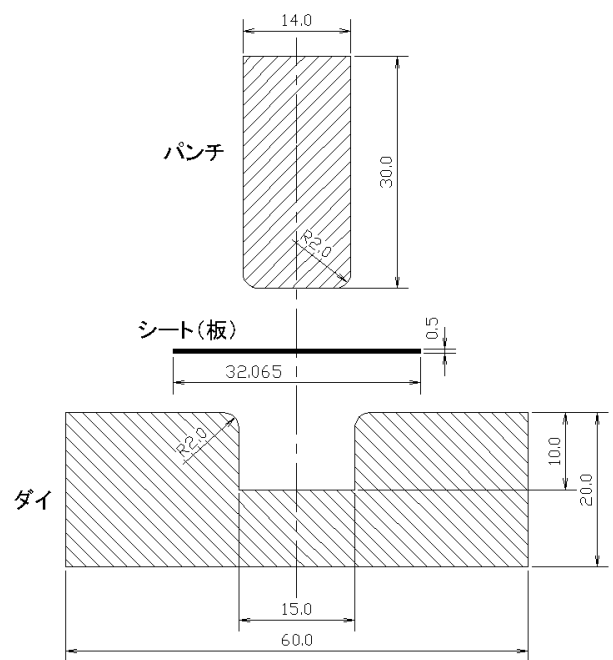


図4 金型形状

表 3 材料物性値

板材	SPCC
E : ヤング率 [GPa]	206
ν : ポアソン比	0.3
Ys : 降伏応力 [MPa]	186.2
[塑性曲線用パラメータ]	$\sigma = A (\epsilon_0 + \epsilon^p)^n$
A : 加工硬化係数	573.76
ϵ_0 : オフセットひずみ	0.0167
n : 加工硬化指数	0.275

表 4 計算条件

解析の対象：平面ひずみ
節点数：1298 (右半分)
要素形状：4節点四角形
要素数：1170 (右半分)
要素の種類：選択的低積分法

材料のモデルは、プレス加工で一般的に使用されている冷間圧延鋼板のSPCC材を想定する。表3および表4には、設定した材料物性値と計算条件を示す。

5. 解析の詳細

5.1 解析作業の流れ

解析の作業では、3種類のソフトウェアを駆使し作業を進める。図5に、解析作業の流れを示す。

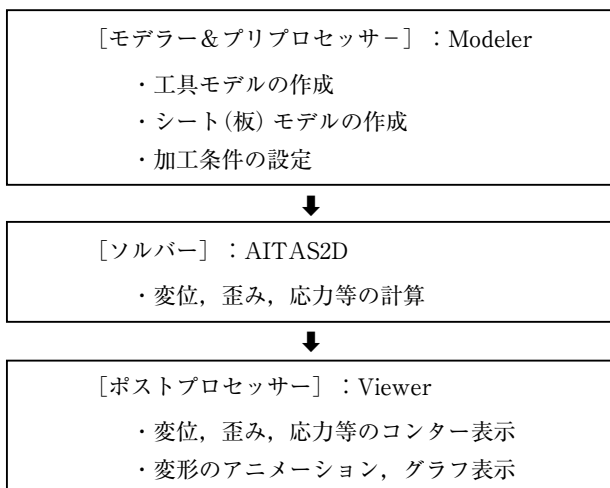


図 5 解析作業の流れ

5.2 モデラー&プリプロセッサ

解析モデルの作成では、Modelerを使用し、①ツ

ールの作成、②シート(板)の作成、③自動レイアウト、④加工条件の設定、⑤データ保存の手順で、作業を進める。ツールの作成では、工具形状を線分と円弧により定義を行え、他の多くの有限要素法プログラムで採用している要素と節点による工具を表現することとは異なるところがAITAS2Dの特徴である。これにより、データの作成および接触の検索処理が比較的容易に行えるようになる。

工具となる形状を作成した後、パンチもしくはダイとして定義を行う必要がある。このとき工具の放線方向がシート(板)のある方向となるように設定を行う必要があり、工具に対してどちらの方向にシート(板)が存在するのかこれにより判断することが可能となる。

シート(板)の定義では、工具の定義とは違い通常の有限要素によりシート(板)のモデルを作成する。シート定義コマンドによりサイズを決定した後、適切なサイズの有限要素分割を行う。その後、分割された要素群の材料物性値の定義を行う。一般的な材料(SPCC, Al, SUS)の材料情報はデータベースより選択することができる。しかし、データベース上に登録されていない材料に関しては、n値、ヤング率、ポアソン比等の値を調べ入力する必要がある。

AITAS2Dなどの有限要素法プログラムでは、解析時間の短縮やディスクの使用量を抑えるため解析形状が対称である場合には、解析計算の範囲を1/2に設定する場合がある。この1/2に分割した位置に属する節点には境界条件を与え、剛体移動による計算の失敗がないよう拘束条件を設定する。

実際のプレス成形加工では、ダイがプレスブレーキのベッドに固定され、パンチがスライドに取り付けられており、スライドが上死点から下死点へ上下運動することによりプレス加工が行われる。一方、有限要素法を用いた解析では、このプレス成形過程のすべてを忠実に再現するのではなく、解析の開始する位置は、まさにパンチが材料に接触し始める直前の、材料に力の加わり始める位置をスタートとする。そのため、有限要素法解析では、工具である要素と素材である要素をそのスタート位置に配置して

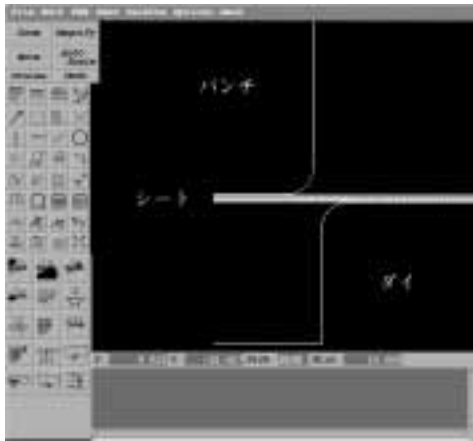


図6 有限要素法モデル

おく必要があり、AITAS2Dには自動的に工具とシート(板)を配置する自動レイアウト機能を有する。図6に、作成した有限要素法モデルを示す。

加工条件の設定では、①解析問題の選択(平面応力、平面ひずみ、軸対称)、②要素応力積分の選択(完全積分法、選択的低積分法、安定化マトリクス法、Shear Lockingを防ぐ選択的低積分法)、③曲げ長さの設定、④要素形状の選択(三角形要素、四角形要素)、⑤出力形式の選択(出力ファイル総数、スプリングバック計算の有無)の設定を行う。

すべての解析条件が整ったことを確認した後、解析計算を行うために必要な、①コントロールファイル(*.ctr)、②工具ファイル(*.svt)、③シートファイル(*.sve)、④Modeler専用ファイル(*.pre)のファイルを出力する。

5.3 ソルバー

ソルバーは、解析計算を行うソフトウェアである。薄板のプレス曲げ加工では、スプリングバック、そり、しわおよび破断が特に問題となる。スプリングバックは製品の加工精度に直接影響を与えるため非常に重要な問題となり、有限要素法による数値解析手法には、上記の現象を正確に解析する機能が必要となる。AITAS2Dでは、静的陽解法を採用することにより、この非線形問題に対処している。

ソルバーでの処理は、プリプロセッサで作成されたコントロールファイルに従い、4つのファイルを読み込み有限要素解析計算を実行する。そして、

コントロールファイルで指示されているパンチの移動量別に変位、ひずみ、応力、節点反力等の解析結果表示用ファイル、計算出力情報に関するファイル、グラフ用ファイルを出力する。また、複数の成形過程を解析する場合には、これと同時に多行程解析のシミュレートを行うために必要な変形後の継続計算用製品モデルファイルおよび継続計算用工具ファイルを出力する。

5.4 ポストプロセッサ

解析結果の表示は、ポストプロセッサのViewerを使用して行う。解析結果ファイルを読み込み変形過程、応力分布、ひずみ分布等を表示する。計算結果を評価する際、上記の解析結果の表示法が直接成形品の評価に利用できない場合が多い。実際のプレス成形では、しわ、そり、スプリングバック、破断が問題となるが、解析結果である要素応力や節点変位またはひずみからでは、直接上記の成形品不良問題と対応していない。そのため、解析結果より実際の成形性の良否を判断する能力が使用者に必要となり、有限要素法解析利用技術の確立および評価方法の確立が重要となる。

図7に、パンチストロークと荷重の関係を示す。また、図8には、パンチストローク位置1.0mmから10.2mmでの、ストローク別でのU曲げ変形過程を示す。

図8には、板の変形過程のシミュレーションとともに材料内部に発生する長手方向応力成分を表示する。図9には、各ストローク別での除荷後の形状を示す。

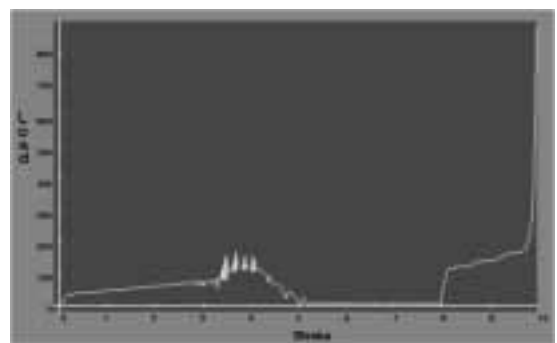


図7 パンチストロークと荷重の関係

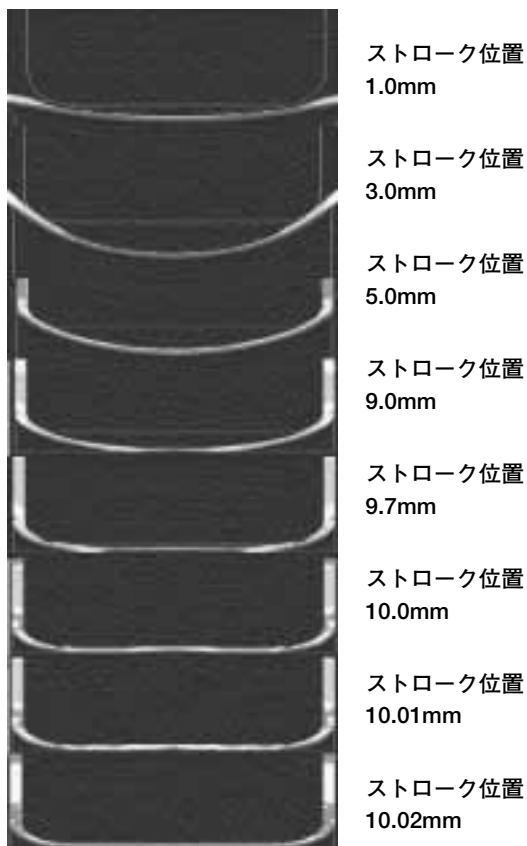


図8 ストローク別のU曲げ変形シミュレーション



図9 ストローク別のスプリングバック後の形状

6. まとめ

本報では、AITAS2Dを使用し、プレスU曲げ加工の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、U曲げ加工時における板の変形過程と除荷後のスプリングバックに注目しシミュレーションを行った。

従来、板材の曲げ加工を行った場合、曲げ角度が材料の持つ弾性の影響で、負荷時の形状と除荷時の形状が違ってしまいう状態となり、スプリングバック後の製品寸法精度がしばしば問題となった。そして、スプリングバック量を従来の経験値より見越し、金型設計を

行い試作と修正を繰り返し完成へと至っていた。

一方、AITAS2Dに見られるプレス成形専用の非線形構造解析プログラムでは、適切なパラメータの設定で非常に精度よく成形過程の予測ができ、莫大な費用と時間をかけた試作と修正を繰り返し行うことなく、コンピュータ上での仮想実験により製品開発を行うことが可能となる。また内部の応力状態によりスプリングバックがなぜ発生するかなど視覚的にその様子を知ることが可能となり、教育的な面でも優れたツールであり、今後はこのような解析ツールを活用しての設計・開発手法や教育手法が数多く導入されると考える。

しかし、その反面、非線形構造解析は、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はる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。

このような状況のなか、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) ㈱アマダメトレクス：『AITAS-System Ver1.1 Bending Solution ユーザ・ガイド』。
- 2) ㈱アマダメトレクス：『曲げ加工過程シミュレーションプログラム AITAS2Dについて』。
- 3) 日本塑性加工学会編：『材料加工の計算力学』，コロナ社。
- 4) 富田佳宏：『弾塑性力学の基礎と応用』，森北出版㈱。
- 5) 日本塑性加工学会編：『非線形有限要素法』，コロナ社。
- 6) 川並高雄ほか：『基礎塑性加工学』，森北出版㈱。