

# つば出し加工に関する塑性加工 CAE 技術の開発

## Development of plastic working CAE technology for "Just Flare" method

技術開発部 工業材料科 工藤弘行 高橋歩弓  
応募企業 日商テクノ株式会社

つば出し加工機の新規開発を効率良く行うため、塑性加工 CAE 技術の活用を検討した。その結果、加工ヘッドの 3 次元螺旋運動を 2 次元軸対称運動に近似し、CAE を 2 次元軸対称解析とすることで、短時間で十分な精度の解析をすることができた。これにより、CAE 上のバーチャル試作が実現し、最適な工程の探索を行うなどの応用が可能である。

Key words: つば出し加工、塑性加工 CAE

### 1. 緒言

応募企業が開発したジャストフレア工法は、配管継ぎ手の施工を行うもので、溶接を必要としないため、溶接熟練工がいなくても施工できるのが長所である。同社は加工機も製造しており、図 1 は加工機で行われる「つばだし加工」の模式図である。加工ヘッドは配管の中心軸まわりに回転すると同時に軸方向へも移動することで、ヘッドと配管端部の接触状態が徐々に変化し、最終的に 1 分 20 秒程度で、つばだし加工が完了し、最後に図 2 のようにフランジ締結することで、施工作业が完了する。

つば出し加工は、塑性加工の分類で言えば、「へら絞り」に代表される回転塑性加工の一種であり、素材と工具と接触点が大きく移動し、接触/非接触を繰り返す多段階の加工となる点が特徴である

同社は、現在、新規加工機を開発中であるが試行錯誤的な手法に頼らざるを得ず、最適な工具軌跡の決定には、多大な時間を要する。そこで、本研究では、ジャストフレア工法に関する塑性加工 CAE 技術を確立し、工程設計に反映できる情報を得ることを目的とした。現実的な計算速度と計算精度を両立する手法の開発を目指し、2 次元軸対称解析および 3 次元解析を行い、比較検討した。なお、新規開発中の加工機については機密事項であるため、本報告では、従来加工の結果のみ記載する。

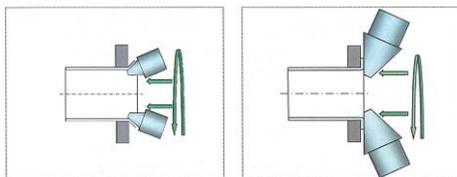


図 1 つばだし加工の模式図

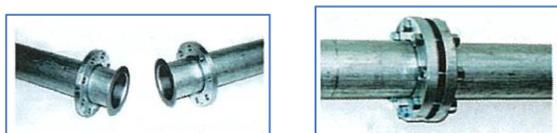


図 2 ルーズフランジ締結の様子

### 2. CAE 解析 (2 次元解析)

#### 2. 1. CAE 解析手法 (2 次元軸対称解析)

ジャストフレア加工では、加工ヘッドと配管の接触点の軌跡は 3 次元的な螺旋運動を描く。しかし、軸方向への移動速度が十分に小さい場合は、工具軌跡は回転運動だけで、配管の変形も軸対称変形挙動に近似できると考え、2 次元軸対称モデルによる CAE 解析を行った。2 次元解析は、SUS304 製で、呼び外径 75 [mm] の SU75A を従来型加工機で加工する例を対象とした。

CAE 解析には、塑性加工に特化した有限要素解析ソフトウェア Simufact. forming (以下、Simufact) を使用した。このソフトウェアは、解析専任者でなくても利用しやすい特徴を持つ。以下に解析に必要な情報を記載する。

#### 2. 1. 1. CAE 解析モデル (形状データ)

図 3 は従来加工の CAE 解析モデルである。モデル中のストッパーは本来存在しない部品であるが、計算を安定させるために配置した。この部品により配管部品が加工力で移動することを防いでいる。

Simufact の 2 次元解析では、3 次元 CAD モデルを利用し、軸対称面などを指定する仕組みであり、対称面を指定する必要がある。図 4 は対称面の指定として、軸対称の設定の状態を示している。

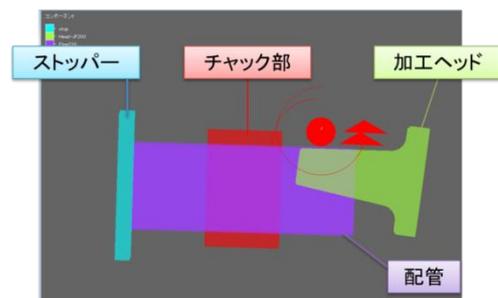


図 3 従来加工の解析モデル

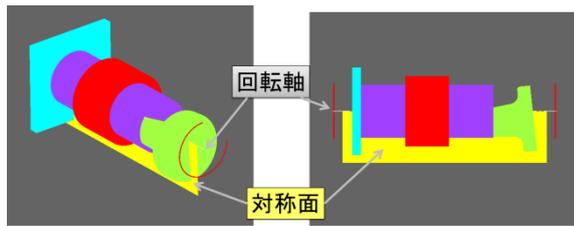


図4 軸対称面の設定画面

### 2. 1. 2. 加工モーション

Simufact では、プレス機の仕組みに応じた多様なプレスモーションを設定できる。本解析では、表形式でモーションを指定する「テーブルプレス」の「時間/ストローク」タイプを用いた。

図5が従来加工の設定例である。モーション設定は並進運動や回転運動を指定でき、運動の基準となる軸を工具毎に個別に設定できる。本解析では、従来型加工機の構造を踏まえ、図6のような回転軸を加工ヘッドに設定することで、実加工を表現している。

プレスタイプ: テーブルプレス (移動 & 回転)				
テーブルタイプ: 時間/ストローク				
時間	ストローク X	ストローク Y	ストローク Z	角度
s	mm	mm	mm	°
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.0	0.0	0.0	0.0	90.0
15.0	0.0	0.0	0.0	90.0
20.0	0.0	0.0	0.0	0.0

図5 従来加工のテーブルプレス設定

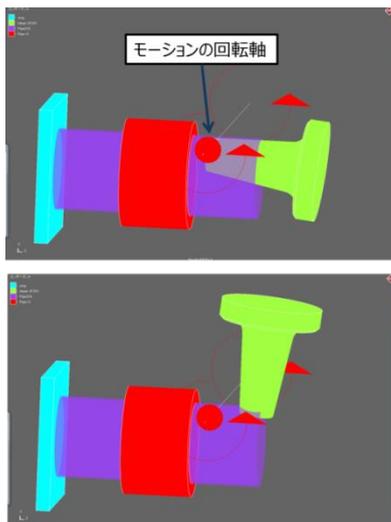


図6 従来加工の加工モーション図

### 2. 1. 3. 材料特性

Simufact では、原則的に工具・金型を剛体、被加工物を弾塑性体として扱う。弾塑性体の変形特性は

「フローカーブ」と呼ばれる応力-ひずみグラフで表現する。図7は、Simufact 独自の材料ライブラリのうち、本解析に使用した SUS304 材のフローカーブである。グラフに 30 本のカーブが存在するのは、温度 10 条件、ひずみ速度 3 条件の組合せのデータを持つためである。実用される塑性加工では、温度や加工速度により「フローカーブ」が変化するため、塑性加工 CAE 活用の難所となるが、Simufact は、材料ライブラリの充実により、材料のデータを持たないユーザーでも CAE 解析が可能である。

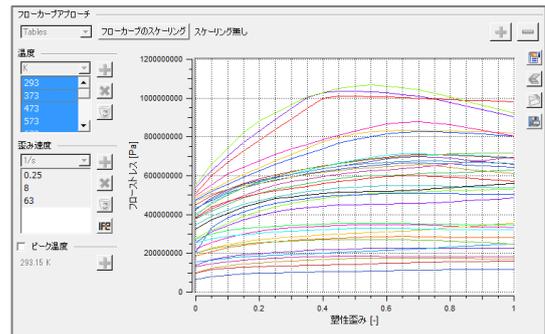


図7 SUS304 材のフローカーブ

### 2. 1. 4. 温度、摩擦

Simufact は、工具-素材間の摩擦熱や、素材が塑性変形することで温度上昇する「塑性発熱」などの熱の発生と、その後の熱伝導計算が可能である。計算に必要な工具や素材の温度、摩擦係数の入力が必要となる。また、熱伝導解析には、固体-固体間や、固体-大気間の熱伝達係数などが必要になるが、Simufact では実際の塑性加工で妥当な計算となるよう自動設定される。

### 2. 2. CAE 解析手法（3次元解析）

Simufact は、加工ヘッドの複雑な 3 次元螺旋運動を表現できないため、加工ヘッドの倒れ運動と回転運動に分けて与える方法を用いた。

従来加工の解析例として、はじめにヘッドに 10 度の倒れを与えた「ヘッド倒れ工程」の解析を行った後、Simufact の前工程結果を引き継ぐ機能を用い、1 回転 (360 [度]) の「ヘッド回転工程」を与える、計 2 工程の解析を連続して行った。

図8は、Simufact の解析結果の読み込み設定ウィンドウである。結果の読み込みは計算の最終結果だけでなく途中経過の読み込みも可能である。読み込める結果は、応力、ひずみ、温度といった基本的なもの他、型摩耗やマイクロ組織情報などにも対応する。さらに、工程間の熱処理についても指定可能であり、実加工に近いシミュレーション条件を設定できる。

今回の例では、応力、ひずみ、変位を引き継いだ解析を行った。図9に回転工程のモデルを示す。こ

のモデルでは、ヘッド倒れ工程による塑性変形が既に生じている。

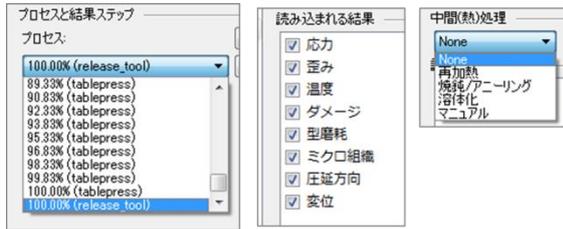


図8 解析結果の読み込み設定ウィンドウ

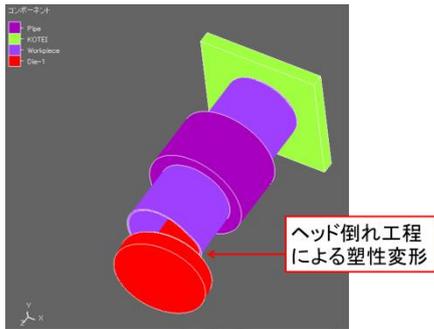


図9 3次元解析モデル（回転工程）

### 3. 結果及び考察

#### 3. 1. CAE 解析結果（2次元解析）

従来加工に関する2次元軸対称解析を行った結果、約4分でヘッドが90度倒れる工程全体の計算を完了した。

従来加工モデルのCAE解析結果として、図10に相当塑性ひずみ分布の2次元表示を示す。相当塑性ひずみは、XYZ3軸のひずみを合成し、スカラー量として算出するもので、塑性加工において最も基本的なパラメータである。

Simufactでは、2次元解析の結果を3次元的に拡張して表示できる。図11は、相当塑性ひずみの3次元表示図である。2次元表示は、拡大して板厚内のひずみ分布など詳細な情報を得るのに向き、3次元表示は、3次元変形挙動を把握するのに向く。また、工具や被加工材の表示の有無を切替えしたり、透明表示にすることが可能である。図11は加工ヘッド、チャック部、ストッパーを非表示とし、被加工材のみを表示している。

相当塑性ひずみは、引張試験における伸びとほぼ同じ意味を持つため、加工素材の破断伸びに近くなると破断の危険性があると判断できる。今回の例では、使用する加工素材SUS304のミルシートに記載される破断伸びは60%（ひずみ0.6）であり、相当塑性ひずみの最大値は、0.48であるのに対して十分大きく、割れ発生の危険性は無いと言える。

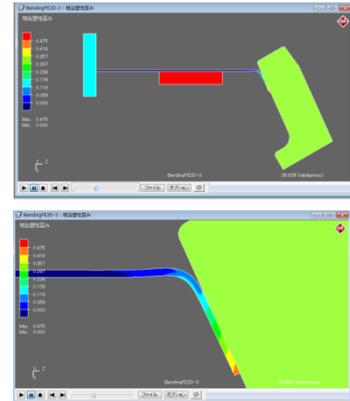


図10 相当塑性ひずみの2次元表示  
(上)全体図 (下)詳細図

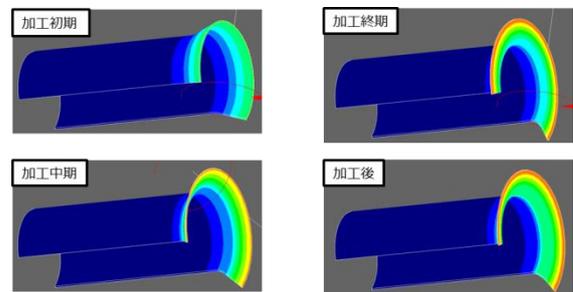


図11 相当塑性ひずみの3次元表示

#### 3. 2. CAE 解析結果（3次元解析）

3次元解析では、ヘッドの倒れ運動工程と回転工程の2工程の解析を実施し、計算時間は合計で6時間程度であった。

図12に回転工程中の代表的な2時点での相当塑性ひずみ分布を示す。工具の回転運動に伴い、工具が通過した領域で、ひずみ分布の高い場所が広がっていくことが分かる。

図13に回転工程後の塑性ひずみ分布図を示すが、ほぼ軸対称のひずみ分布となっている。最外径部で最大となり、最大値は0.158であった。

図14は回転工程後の変位分布図で、代表的な4方向の変位の絶対値を示した。また、加工ヘッドの動きを模式的に矢印で示した。半径方向の変位は、2.8~3.0 [mm]の範囲であった。変位が2.8 [mm]と小さかったのは加工の開始直後であり、CAE解析の都合で工程を分割したことが理由であると思われる。

3次元解析との比較のため、同一条件の2次元軸対称解析を行い、図15に示した。相当塑性ひずみの最大値は0.147、最大変位は2.89 [mm]であった。2次元結果と3次元解析結果はほぼ同等の結果であり、2次元解析は十分な精度を持つと思われる。工程設計に使う解析は解析時間が圧倒的に短い2次元解析が望ましいと結論付けた。

2次元解析は数分で終了するため、複数条件の計算を一度に実施することも容易である。例えば、加工ヘッドの軌跡について、複数の解析結果を比較すれば、より最適なヘッド軌跡の探索をコンピュータ内のソフトウェア上で実施できる。これは、実加工機の試作に対して、「バーチャル試作」と言えるものである。「バーチャル試作」は、実加工に必要な段取り替えの準備が不要であることや、自由な視点・視野から自由な速度で何度でも繰り返し見ることができると、大きなメリットがあり、新規加工機の開発に有用と考えられる。

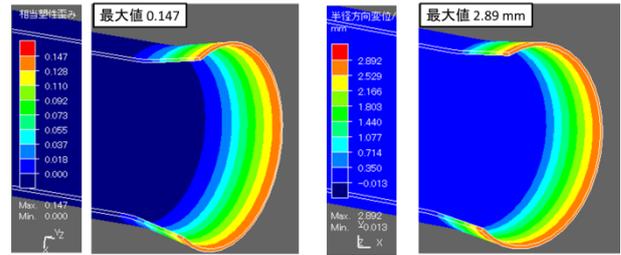


図 15 2次元軸対称解析の結果（比較対象）  
（左）相当塑性ひずみ（右）半径方向変位

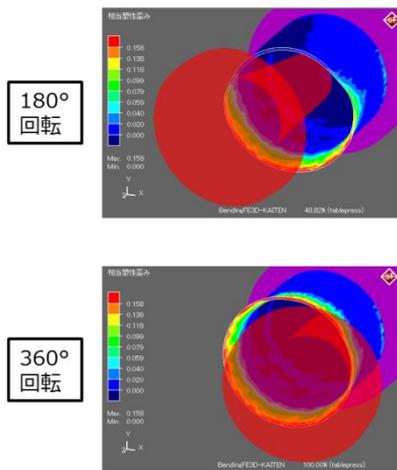


図 12 回転工程の相当塑性ひずみ分布

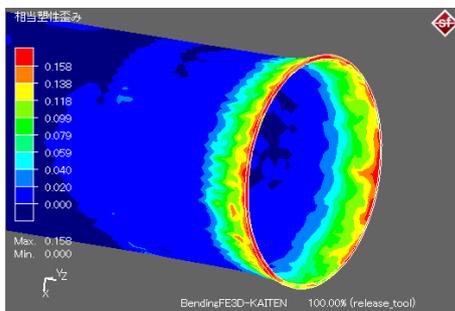


図 13 回転工程後の相当塑性ひずみ分布結果

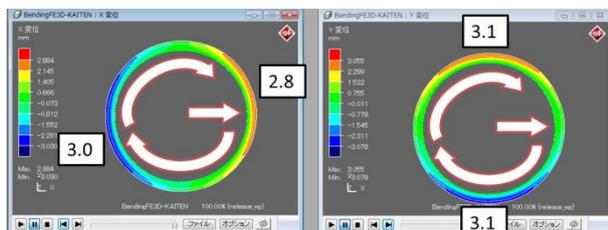


図 14 回転工程後の変位分布結果  
（左）X方向変位（右）Y方向変位

#### 4. 結言

本事業では応募企業が開発するジャストフレア工法の「つばだし加工」に関する CAE 解析を行い、計算時間と計算精度を両立する手法の検討を行った。これらの結果から以下の知見が得られた。

- ① 実加工を近似した 2次元軸対称解析を行った結果、4分程度の計算時間で加工工程全体を計算できることを確認した。
- ② 実加工を分割的に近似した 3次元解析による解析を行った結果、1回転分の加工に対し、約6時間の計算時間を要することを確認した。
- ③ 3次元解析で得られた結果は、概ね軸対称的な分布であり、2次元解析の結果とほぼ同等であることから、工程設計には2次元解析が向いていると結論づけた。
- ④ 従来加工における相当塑性ひずみの最大値は 0.48 であり、ミルシート上の引張試験の破断伸び 60%（ひずみ 0.6）に対して、十分に安全である。