

異形中空材の製造技術に関する研究 第1報 ——異形(中空)材の引抜き加工汎用シミュレータの開発——

Study on Computer Aided Simulation of Drawing of Non-Axisymmetric Tubular Products (1st Report)

木 内 学*・木 村 隆 秀**
Manabu KIUCHI and Takahide KIMURA

1. ま え が き

引抜き・押し出し加工は、特殊な場合を除けば定常変形であり、一見単純にみえる加工法である。しかし、非軸対称断面を有する中空材・中空材(以後、異形(中空)材と称する。)の引抜き・押し出し加工の場合には、ダイス内における材料の塑性流動は、三次元的分布、すなわち、長手(軸)方向速度成分、半径方向速度成分のみならず、複雑な円周方向速度成分を有しており、その挙動を的確に把握するのは容易ではない。したがって、異形(中空)材の引抜き・押し出し加工に関する理論的研究は非常に少なく、その内容も中空材に関する部分的、個別的なものがほとんどであり、実際の生産現場で所要の製品を得るための適切な工具形状、寸法等を見出すに当たっても、経験的知識に頼ってきたのが実状である。そこで、筆者らは、異形(中空)材の引抜き・押し出し加工を総合的、体系的に検討する三次元の基本解析モデルを提案し、その実際問題への適用として、矩形管の製造・加工に適用する矩形管解析モデルを作成し、その有効性を確認した。さらにそれを拡張して、異形(中空)材の引抜き加工汎用シミュレータを構成する一般解析モデルを提案した。以下にその結果について報告する。

2. 基本解析モデル

基本解析モデルの構成に際しては円筒座標系を用い、引抜き・押し出し加工中の材料に関して次の仮定をもうけた(図1参照)。
①材料は剛完全塑性体で、ミーゼスの降伏条件に従う。
②変形中の材料の内外面形状は中心軸を含む任意の断面内で直線で近似される。(これが一直線となる場合を、直線モードと称する。)
③材料の長手(軸)方向速度は中心軸に垂直な断面内で一様である。
④材料内の任意の点の円周方向速度は中心軸からの距離に関して一次の関数で近似できる。
⑤その面上で円周方向速度が0となる中心軸を含む断面が少なくとも一面存在する。

* 東京大学生産技術研究所 第2部
** 古河電気工業株式会社

以上の仮定と材料の内外面での境界条件より、次の三次元動的相容速度場を導出した。その長手(軸)方向速度を V_y 、円周方向速度を V_ϕ 、半径方向速度を V_r とすると、

$$V_y(r, \phi, y) = V_y(y) = V_0 \int_0^{\phi_r} \{r_{\phi 0}^2(\phi, 0) - r_{\phi i}^2(\phi, 0)\} d\phi / \int_0^{\phi_r} \{r_{\phi 0}^2(\phi, y) - r_{\phi i}^2(\phi, y)\} d\phi \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$V_\phi(r, \phi, y) = r\omega(\phi, y) = \frac{-r}{r_{\phi 0}^2(\phi, y) - r_{\phi i}^2(\phi, y)} \times \int_0^{\phi_r} \frac{\partial}{\partial y} \{r_{\phi 0}^2(\phi, y) - r_{\phi i}^2(\phi, y)\} V_y(y) d\phi \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$V_r(r, \phi, y) = \frac{r_{\phi i}^2(\phi, y) - r^2}{2r} \left\{ \frac{\partial V_y(y)}{\partial y} + \frac{\partial \omega(\phi, y)}{\partial \phi} \right\} + \frac{r_{\phi i}(\phi, y)}{r} \left\{ \omega(\phi, y) \frac{\partial r_{\phi i}(\phi, y)}{\partial \phi} + V_y(y) \frac{\partial r_{\phi i}(\phi, y)}{\partial y} \right\} = \frac{r_{\phi 0}^2(\phi, y) - r^2}{2r} \left\{ \frac{\partial V_y(y)}{\partial y} + \frac{\partial \omega(\phi, y)}{\partial \phi} \right\} + \frac{r_{\phi 0}(\phi, y)}{r} \left\{ \omega(\phi, y) \frac{\partial r_{\phi 0}(\phi, y)}{\partial \phi} + V_y(y) \frac{\partial r_{\phi 0}(\phi, y)}{\partial y} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。

加工に要する仕事率としては、内部仕事率 δW_i 、ダイス表面での摩擦仕事率 δW_{f1} 、プラグ表面での摩擦仕事率 δW_{f2} 、ダイス入口境界での剪断仕事率 δW_{s1} 、ダイス出口境界での剪断仕事率 δW_{s2} 、内部剪断面での剪断仕事率 δW_{sx} があり(図2参照)、以下のように定式化される。

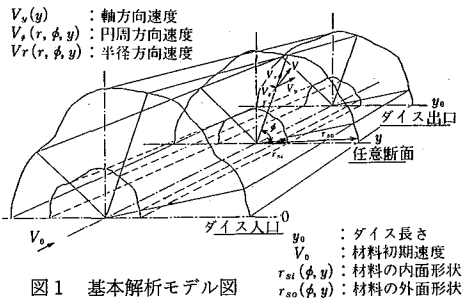


図1 基本解析モデル図

研 究 速 報

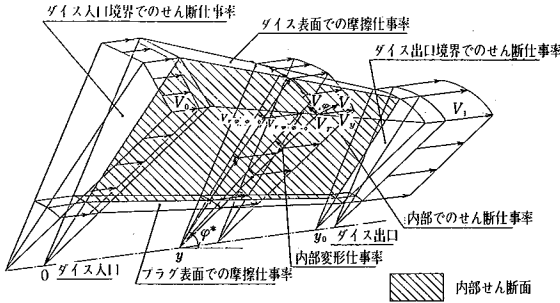


図 2 加工に要する仕事率

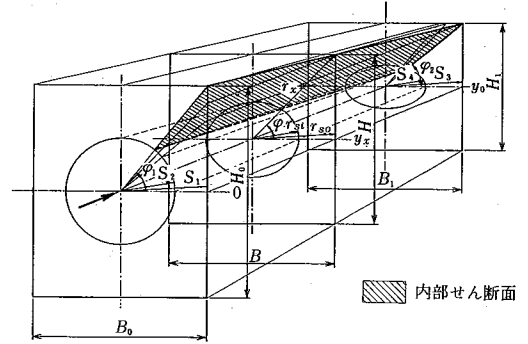


図 3 矩形管解析モデル図

$$\delta W_i = Y \int_0^{y_0} \int_0^{\phi_1} \int_{r_{si}(\phi, y)}^{r_{so}(\phi, y)} r \left[\frac{2}{3} \{ \delta \epsilon_{rr}^2 + \delta \epsilon_{\phi\phi}^2 + \delta \epsilon_{yy}^2 + 2(\delta \epsilon_{r\phi} + \delta \epsilon_{\phi y} + \delta \epsilon_{yr}) \} \right]^{\frac{1}{2}} dr d\phi dy \dots\dots\dots (4)$$

$$\delta W_{f1} = \frac{m_1 Y}{\sqrt{3}} \int_0^{\phi_1} \int_{r_{so}(\phi, y)}^{r_{si}(\phi, y)} \{ V_r^2(r, \phi, y_{so}(r, \phi)) + r^2 \omega^2(\phi, y_{so}(r, \phi)) + V_y^2(y_{so}(r, \phi)) \}^{\frac{1}{2}} r^2 + r^2 \left\{ \frac{\partial y_{so}(r, \phi)}{\partial r} \right\} + \left\{ \frac{\partial y_{so}(r, \phi)}{\partial \phi} \right\}^2 \right]^{\frac{1}{2}} dr d\phi \dots\dots (5)$$

$$\delta W_{f2} = \frac{m_2 Y}{\sqrt{3}} \int_0^{\phi_1} \int_{r_{si}(\phi, y)}^{r_{so}(\phi, y)} \{ V_r^2(r, \phi, y_{si}(r, \phi)) + r^2 \omega^2(\phi, y_{si}(r, \phi)) + V_y^2(y_{si}(r, \phi)) \}^{\frac{1}{2}} r^2 + r^2 \left\{ \frac{\partial y_{si}(r, \phi)}{\partial r} \right\}^2 + \left\{ \frac{\partial y_{si}(r, \phi)}{\partial \phi} \right\}^2 \right]^{\frac{1}{2}} dr d\phi \dots\dots (6)$$

$$\delta W_{si} = \frac{Y}{\sqrt{3}} \int_0^{\phi_1} \int_{r_{si}(\phi, 0)}^{r_{so}(\phi, 0)} r \{ V_r^2(r, \phi + 0) + V_r^2(r, \phi + 0) \}^{\frac{1}{2}} dr d\phi \dots\dots\dots (7)$$

$$\delta W_{so} = \frac{Y}{\sqrt{3}} \int_0^{\phi_1} \int_{r_{si}(\phi, y_0)}^{r_{so}(\phi, y_0)} r \{ V_r^2(r, \phi, y_0 - 0) + V_r^2(r, \phi, y_0 - 0) \}^{\frac{1}{2}} dr d\phi \dots\dots\dots (8)$$

$$\delta W_{sx} = \frac{Y}{\sqrt{3}} \int_0^{y_0} \int_{r_{si}(\phi^*, y)}^{r_{so}(\phi^*, y)} \left| \frac{\omega(\phi^*, y)}{r \{ r_{so}^2(\phi^*, y) - r_{si}^2(\phi^*, y) \}} \left[r_{so}(\phi^*, y) \{ r^2 - r_{si}^2(\phi^*, y) \} \left\{ \frac{\partial r_{so}(\phi^* + 0, y)}{\partial \phi} - \frac{\partial r_{so}(\phi^* - 0, y)}{\partial \phi} \right\} + r_{si}(\phi^*, y) \{ r_{so}^2(\phi^*, y) - r^2 \} \right] \times \left\{ \frac{\partial r_{si}(\phi^* + 0, y)}{\partial \phi} - \frac{\partial r_{si}(\phi^* - 0, y)}{\partial \phi} \right\} \right| dr dy \dots (9)$$

(直線モード)

そして、全仕事率 δW_T を次式で定義する。

$$\delta W_T = \delta W_i + \delta W_{f1} + \delta W_{f2} + \delta W_{si} + \delta W_{so} + \sum \delta W_{sx}$$

以上の関係式を用いると、異形(中空)材のダイス入側、出側の内外面形状がダイス、プラグ等で規定されて

いる場合の材料の変形・流動や加工力のシミュレーションが可能である。さらに、空引きの場合のように材料が自由境界面をもつ場合には、その面の形状をパラメータとして全体仕事率を最小化することにより、自由境界面の形状、ひいては製品の断面形状・寸法を近似的に予測することが可能となる。

3. 矩形管解析モデル

矩形管解析モデルは、外形コーナRのない矩形管の、プラグを用いない引抜き・押し出し加工の過程を、材料の内面形状が加工によって円から楕円に変形するという近似のもとで解析するモデルである。(図3参照)ダイス面は平面で構成されるとするので、図3のように内部剪断面は $\phi_2 < \phi_1$ とすると、 $\phi_2 < \phi < \phi_1$ の範囲で軸方向にらせん状に回転する曲面となる。よって、そこでの剪断仕事率 δW_{sx} は、基本解析モデルの直線モードにおける式とは異なり、次式で定式化される。

$$\delta W'_{sx} = \frac{Y}{\sqrt{3}} \left| \int_{\phi_1}^{\phi_2} \int_{r_{si}(\phi, y_x(\phi))}^{r_{so}(\phi, y_x(\phi))} \omega(\phi, y_x(\phi)) \frac{r_{so}(\phi, y_x(\phi)) \{ r^2 - r_{si}^2(\phi, y_x(\phi)) \} \left\{ \frac{\partial r_{so}(\phi + 0, y_x(\phi))}{\partial \phi} - \frac{\partial r_{so}(\phi - 0, y_x(\phi))}{\partial \phi} \right\}}{r \{ r_{so}^2(\phi, y_x(\phi)) - r_{si}^2(\phi, y_x(\phi)) \}} \left[r^2 + r^2 \left\{ \frac{\partial y_x(\phi)}{\partial r} \right\}^2 + \left\{ \frac{\partial y_x(\phi)}{\partial \phi} \right\}^2 \right]^{\frac{1}{2}} dr d\phi \right| \dots\dots\dots (10)$$

実際の計算手順は、図4のフローチャートに示すように、材料のダイス出側内面形状を楕円と仮定しているの、そのときの両者の値と全仕事率が出力される。

4. 矩形管解析モデルによる解析結果

図5はダイス長さがダイス出側内面形状に与える影響についてみた図である。これよりダイス長さが増すと、ダイス出側の肉厚は増加し、加工による断面減少率は低下することがわかる。また、肉厚の増加の割合は位置に

よって異なり、肉厚変化の小さい長径側は、短径側と比較してより強くダイス長さの影響を受けることがわかる。図 6 はダイス長さが断面減少率に与える影響についてみた図である。ダイス長さが長くなると、サイズを問わず断面減少率は低下する。また、素管内径が大きくなるほど、肉厚増加が容易となり、断面減少率は小さくなる。図 7 はそのときのダイス長さと同無次元化加工力の関係をみたものである。解析例が少ないために最適ダイス長さが示されていないが、サイズによらずいずれも同様な傾向を示している。図 8 はダイス出側外面形状がその内面形状に与える影響についてみたものである。ダイス出側の外形幅が等しい場合、その高さを低くすると断面減少率は増加するが、幅方向にも増肉することがわかる。図 9 は摩擦定数がダイス出側内面形状に与える影響についてみたものである。潤滑が悪くなり、摩擦定数が大きくなると、ほぼ均一に増肉し、ダイス出側内面形状は偏平化していくことがわかる。また、そのときの摩擦定数と同無次元化加工力の関係をみたのが図 10 である。無次元化加工力は摩擦定数の増加にともないほぼ直線的に増加しているが、増肉の影響でその割合はわずかずつながらゆるやかになってゆくことがわかる。

な傾向を示している。図 8 はダイス出側外面形状がその内面形状に与える影響についてみたものである。ダイス出側の外形幅が等しい場合、その高さを低くすると断面減少率は増加するが、幅方向にも増肉することがわかる。図 9 は摩擦定数がダイス出側内面形状に与える影響についてみたものである。潤滑が悪くなり、摩擦定数が大きくなると、ほぼ均一に増肉し、ダイス出側内面形状は偏平化していくことがわかる。また、そのときの摩擦定数と同無次元化加工力の関係をみたのが図 10 である。無次元化加工力は摩擦定数の増加にともないほぼ直線的に増加しているが、増肉の影響でその割合はわずかずつながらゆるやかになってゆくことがわかる。

5. 異形(中空)材の一般解析モデル

異形(中空)材の一般解析モデルは、基本解析モデル、さらに上述の矩形管解析モデルを拡張したもので、ほと

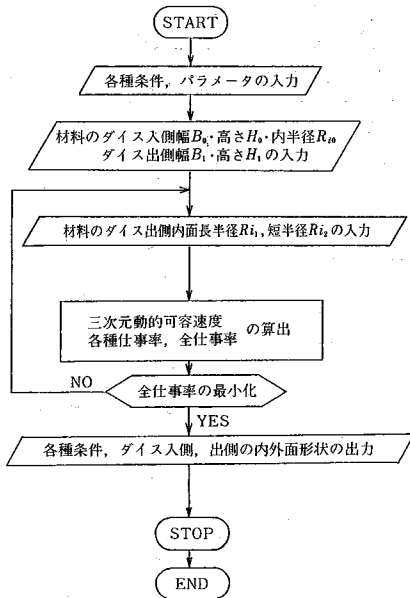


図 4 矩形管解析モデル計算フローチャート

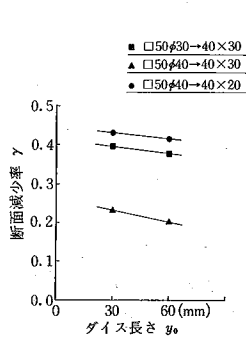


図 6 ダイス長さと同断面減少率

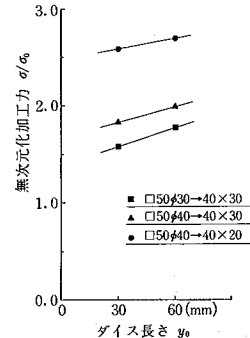


図 7 ダイス長さと同無次元化加工力

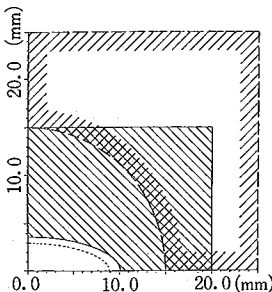
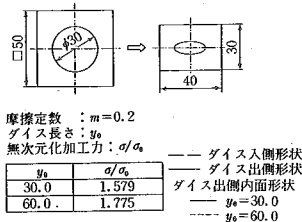


図 5 ダイス長さと同ダイス出側内面形状

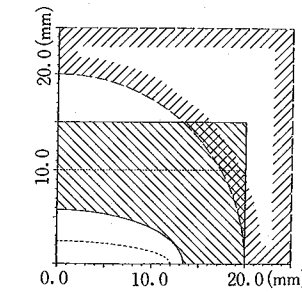
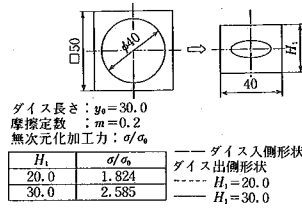


図 8 ダイス出側外面形状と同内面形状

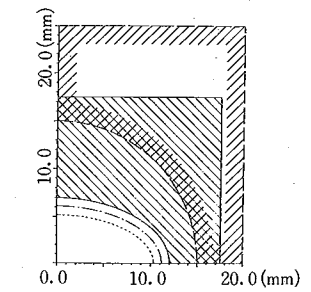
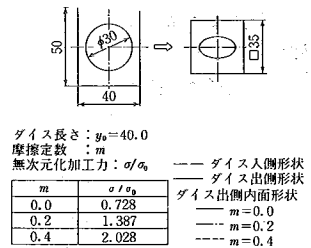


図 9 摩擦定数と同ダイス出側内面形状

研 究 速 報

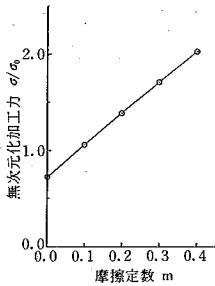


図10 摩擦定数と無次元化加工力

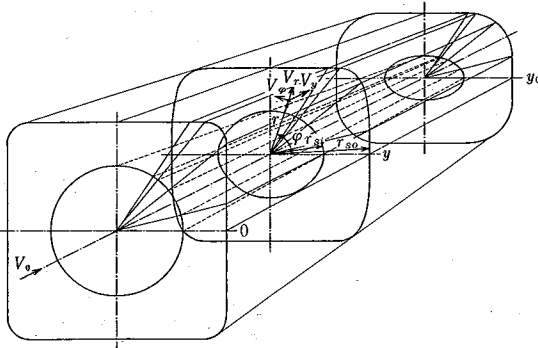


図11 異形(中空)材の一般解析モデル図

んどすべての異形(中空)材の引抜き・押し加工における材料の変形・流動と加工力, ならびにダイス出側(製品)内面形状を予測することを可能とするモデルである。本モデルの理論的構成の詳細は省略するが, 手法的には基本解析モデルの一般化に基づいている。その際, 材料のダイス入側・出側での内外面形状は任意の数の直線と円弧のつらなり, もしくは円が楕円で近似し, 変形中のその内外面形状は直線モードで近似した(図11参照)。本モデルは, プラグを用いる場合のプラグと材料のはく離の発生限界の解析や製品の内外面形状が決まっている際の最適ダイス形状の解析にも適用可能であり, 加工硬化の影響についても考慮されている。これらの概要とその解析結果の実際加工との整合性については次報において説明するが, 本モデルの計算フローチャートを図12に, 矩形管の空引きの解析例を図13に示す。

6. ま と め

提案した異形(中空)材の引抜き・押し加工を総合的, 体系的に検討する三次元の基本解析モデルを用いて,

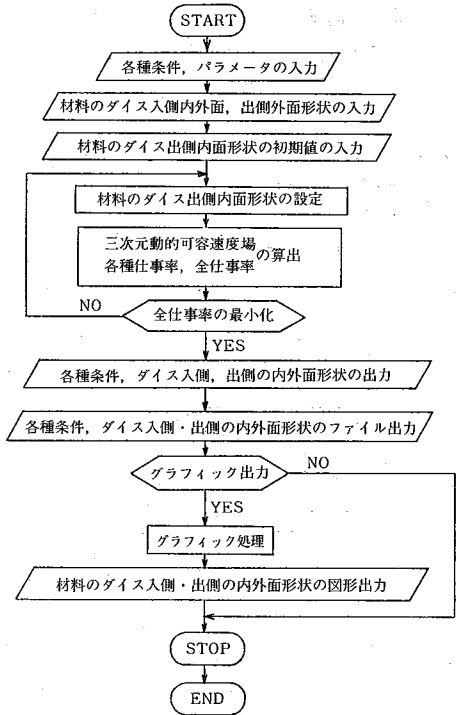


図12 一般解析モデル計算フローチャート

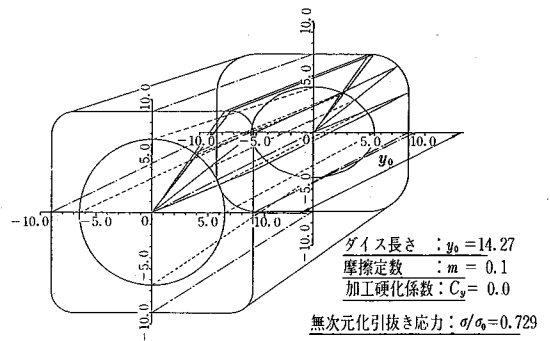


図13 矩形管の空引きの解析例

矩形管解析モデルを作成し, その妥当性を確認した。また, それらを拡張して, 異形(中空)材の一般解析モデルを導出した。(1984年8月6日受理)

参 考 文 献

- 1) 木内・石川 第32回塑性加工連合講演会(1981), 216