

異形中空材の製造技術に関する研究・第2報

——異形(中空)材の引抜き加工汎用シミュレータの応用——

Study on Computational Simulation of Drawing of Non-Axisymmetric Tubular Products (2nd Report)

木 内 学*・木 村 隆 秀**

Manabu KIUCHI and Takahide KIMURA

1. ま え が き

筆者らは、これまで理論的研究が少なく、もっぱら経験的知識に頼って行われている非軸対称断面を有する中実材・中空材(以後、異形(中空)材と称する。)の引抜き・押し出し加工を、総合的、体系的に検討する解析モデルの開発を行ってきた。第1報では、異形(中空)材の基本解析モデルを提案し、その応用として、矩形管の引抜き・押し出し加工を解析する矩形管解析モデルを作成し、その解析例を示した。さらにその拡張として、異形(中空)材の引抜き加工汎用シミュレータのための一般解析モデルを導出した。本報では、この汎用シミュレータによる解析結果、ならびに実際加工との比較・検討を行った結果について報告する。

2. 異形(中空)材の引抜き加工汎用シミュレータの概要

本汎用シミュレータは、異形(中空)材の引抜き加工において、材料内に三次元の動的可容速度場を構成し、材料の変形・流動や加工力のほか、ダイス出側の製品の内面形状なども予測するシミュレータである。この三次元動的可容速度場には円筒座標系を用いており、次の仮定に基づいて構成されている。①材料の長手(軸)方向速度 V_z は、 y のみの関数である。②材料の円周方向速度 V_θ は、任意の点 (r, ϕ, y) で中心軸からの距離 r に比例する。③ $V_\theta = 0$ となる中心軸を含む断面が少なくとも一面存在する。また、材料のダイス入側での内外面形状は、任意の数の直線と円弧のつらなり、もしくは円か楕円で近似され、変形中の内外面形状は、中心軸を含む任意の断面上で直線状である(これを、直線モードと称する。)とする。実際の変形の解析にあたっては、“ダイス出口に至る材料の内面形状は加工に要する全仕事率を最小にする”という解の収束判定条件を導入し、これに対応するダイス出側内面形状をもとめ、その形状とそのときの無次元化引抜き応力を解析値として出力する。

* 東京大学生産技術研究所 第2部

** 古河電気工業株式会社

3. 矩形管の解析例

図1、図2は、素管に対して製品の外形コーナーRが大、もしくは小となる場合の二種類の引抜き加工について、他の加工諸元を変化させた場合のダイス出側(製品)内面形状の解析結果である。図1からわかるように、小さな外形コーナーRをつける場合、製品内面の45°付近に盛り上がりが発生する。また、大きな外形コーナーRをつける場合は、図2からわかるように、45°付近が多少つぶれた形状となる。さらに、いずれの加工においても、摩擦定数、加工硬化係数が大きくなると、製品の断面は全体的に増肉する。一方、素管内径が小さくなり、いわゆる極厚管となると、加工自体による肉厚の変化が小さくなり、断面減少率が高くなることがわかる。図3には、素管内径と断面減少率の関係を示す。これより、大きな外形コーナーRに加工するほうが断面減少率は全体的に大きくなるが、素管内径が大きくなるとその影響はほとんどなくなることがわかる。また、摩擦条件や材質は、極薄管や極厚管の断面減少率にあまり影響を与えないこともわかる。図4には、素管内径と無次元化引抜き応力の関係を示す。無次元化引抜き応力は、大きな外形コーナーRに加工する場合は、小さな外形コーナーRに加工する場合よりも大きくなり、その差は、摩擦定数によらず、加工硬化係数によりほぼ定まる。ところで、摩擦定数を一定とすると、素管内径が変化してもダイス表面での摩擦仕事率はあまり変化しない。そのため、摩擦定数が大きい場合、無次元化引抜き応力は素管の内径が大きくなり断面積が減少すると著しく増加する。

4. 実際加工との比較・検討

この異形(中空)材の引抜き加工汎用シミュレータを実際の生産現場で応用するための第一歩として、銅の矩形管の引抜き加工の実験を行い、結果を比較・検討した。実験では、供試材として素管外形φ18R2、内径φ4, φ9.2, φ16のH材、O材を用い、潤滑および無潤滑状態で4種類のダイスにより空引きし、そのときの加工力、および

研究速報

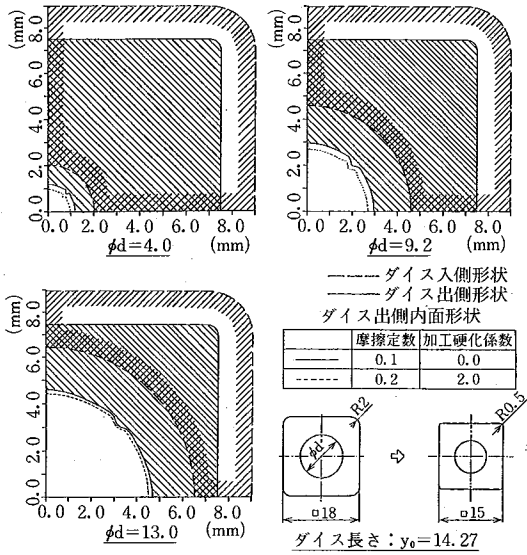


図1 各条件下でのダイス出側内面形状の解析 ① (1/4断面)

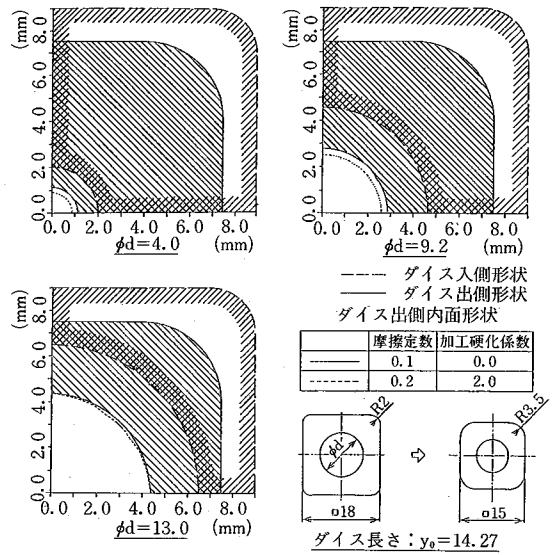


図2 各条件下でのダイス出側内面形状の解析 ② (1/4断面)

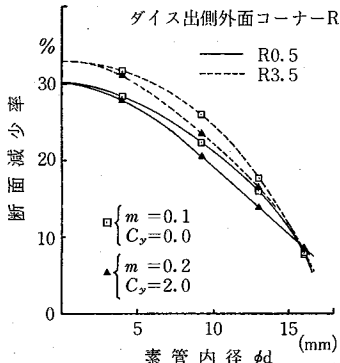


図3 素管内径と断面減少率

ダイス出側(製品)内面形状を測定した。ダイスは、解析結果との比較のために材料との接触面を直線モードに合わせて製作したもの3種類と、実生産で使われているもの1種類を用いた。また、対応する解析では、H材の加工硬化係数 $C_v = 0$ とした。

図5~図10に、直線モードのダイスによる実験値と解析値を比較した結果を示す。供試材の形状測定は投影機を用いたが、全体の測定誤差は ± 0.1 mm程度なので、図より解析値は実際の製品の形状をよくシミュレートできているといえる。ただし、図5~図7にみられる部分的な盛り上がりは実験結果には認められず、本シミュレータにもなお改善の余地はあると思われる。なお、解析における摩擦定数 m は、各素管につき一定とし、H材の実験での加工力より算出される平均ダイス面圧から摩擦抵

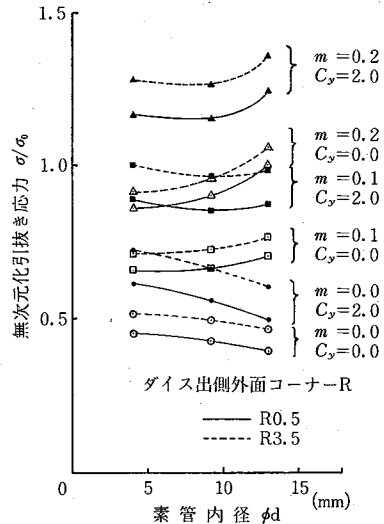
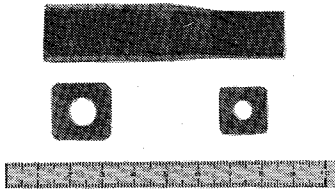
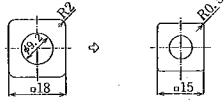


図4 素管内径と無次元化引抜き応力

抗を推定し、その結果より m の値を概算して用いた。また、O材の加工硬化係数 C_v は、製品の変形抵抗が実験した製品のそれと一致するように決定した。図11には、実験値と解析値の断面減少率の比較結果を示す。図5~図10からもわかるように、断面減少率は解析値では多少低めとなるが、両者の傾向はよく一致している。図12には両者の無次元化引抜き応力の比較結果を示す。解析では m を概算したので、実験値と解析値の無次元化引抜き応力の傾向が逆となってしまったが、数値的に両者はよく一致しており、 m を改善すれば傾向の喰い違いも解消す



B2HL (H材, 潤滑)



ダイス長さ $y_0=14.27$

実験値：引抜き応力 $\sigma=20.82\text{kg/mm}^2$
 解析値：摩擦定数 $m=0.05$
 無次元化引抜き応力 $\sigma/\sigma_0=0.5458$

——ダイス入側内外面形状
 ——ダイス出側内面形状
 ——実験値, ----解析値

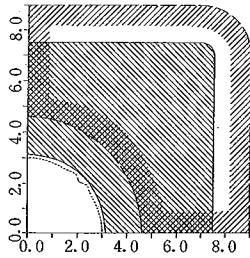
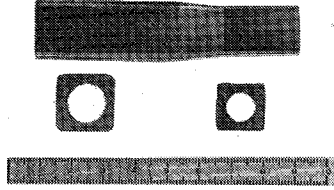
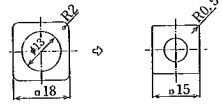


図5 (写真1)



C2HL (H材, 潤滑)



ダイス長さ $y_0=14.27$

実験値：引抜き応力 $\sigma=21.45\text{kg/mm}^2$
 解析値：摩擦定数 $m=0.04$
 無次元化引抜き応力 $\sigma/\sigma_0=0.5183$

——ダイス入側内外面形状
 ——ダイス出側内面形状
 ——実験値, ----解析値

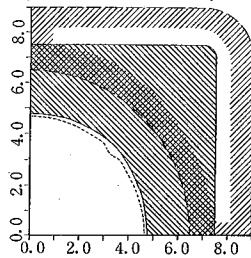
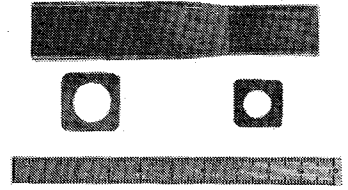
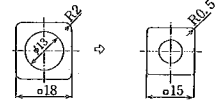


図6 (写真2)



C20NL (O材, 無潤滑)



ダイス長さ $y_0=14.27$

実験値：引抜き応力 $\sigma=10.92\text{kg/mm}^2$
 解析値：摩擦定数 $m=0.04$ $C_0=50.0$
 無次元化引抜き応力 $\sigma/\sigma_0=3.719$

——ダイス入側内外面形状
 ——ダイス出側内面形状
 ——実験値, ----解析値

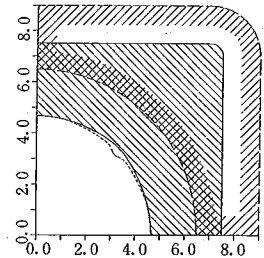
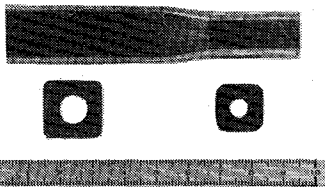
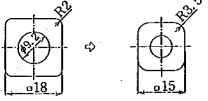


図7 (写真3)



B3HL (H材, 潤滑)



ダイス長さ $y_0=14.27$

実験値：引抜き応力 $\sigma=22.92\text{kg/mm}^2$
 解析値：摩擦定数 $m=0.05$
 無次元化引抜き応力 $\sigma/\sigma_0=0.61$

——ダイス入側内外面形状
 ——ダイス出側内面形状
 ——実験値, ----解析値

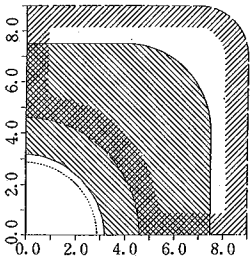
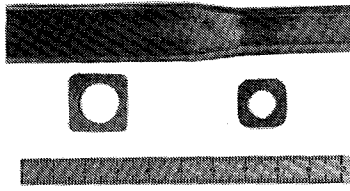
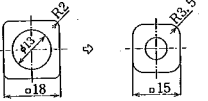


図8 (写真4)



C3HL (H材, 潤滑)



ダイス長さ $y_0=14.27$

実験値：引抜き応力 $\sigma=23.38\text{kg/mm}^2$
 解析値：摩擦定数 $m=0.04$
 無次元化引抜き応力 $\sigma/\sigma_0=0.5859$

——ダイス入側内外面形状
 ——ダイス出側内面形状
 ——実験値, ----解析値

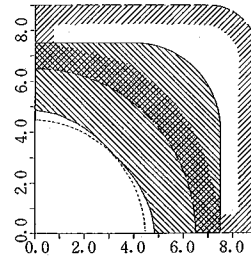
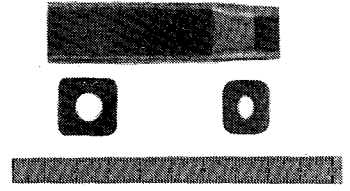
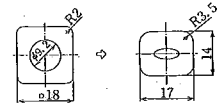


図9 (写真5)



B5HL (H材, 潤滑)



ダイス長さ $y_0=14.27$

実験値：引抜き応力 $\sigma=21.14\text{kg/mm}^2$
 解析値：摩擦定数 $m=0.05$
 無次元化引抜き応力 $\sigma/\sigma_0=0.5673$

——ダイス入側内外面形状
 ——ダイス出側内面形状
 ——実験値, ----解析値

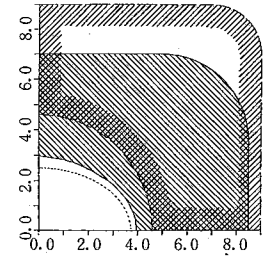


図10 (写真6)

実験結果の写真および解析結果との比較 (1/4 断面)

研究速報

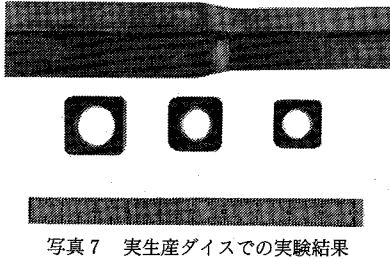


写真7 実生産ダイスでの実験結果

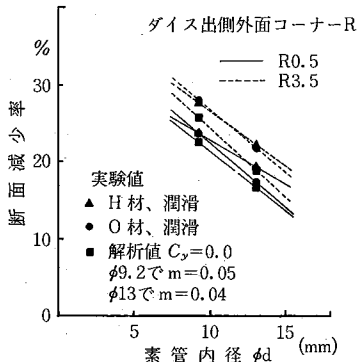


図11 素管内径と断面減少率

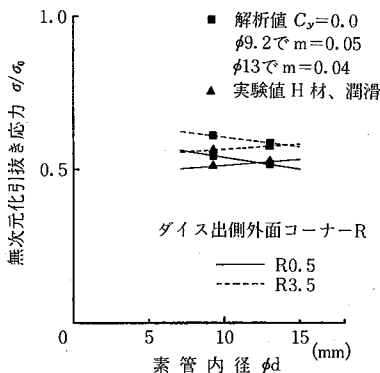


図12 素管内径と無次元引抜き応力

ると考えられる。

実際の生産現場では異なる寸法の素管に対してダイスを共用する。この実生産のダイスによる実験では、素管は写真7・図13に示すように、ダイスとコーナー部から部分接触を開始し、徐々に自由表面をなす外形寸法を減らしつつもダイスとの接触面積をふやし、全面接触に至る。この引抜き過程について、まず全面接触以後についてはあらかじめ別に解析しておいた V_θ, V_r を境界条件として考慮しつつ解析したところ、図14に示すように実験結果と非常によく一致することがわかった。次に、“素管の外形寸法はダイスに全面接触するまで変化しない”という近似のもとで、ダイスを部分接触部、全面接触部の2つに分割して解析した結果は図15に示すように実

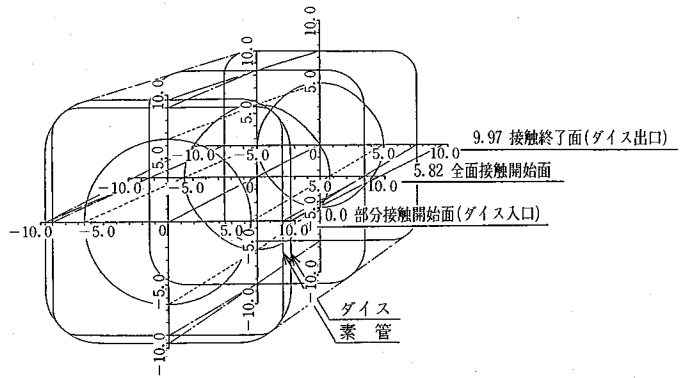


図13 実際加工における変形過程

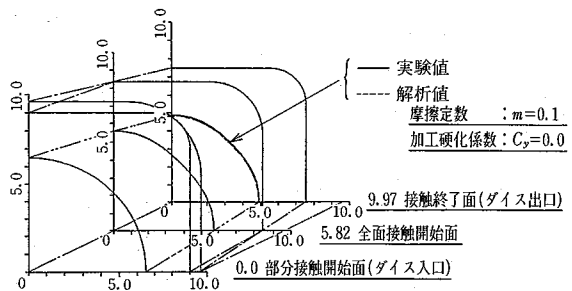


図14 全面接触後の解析値と実験値

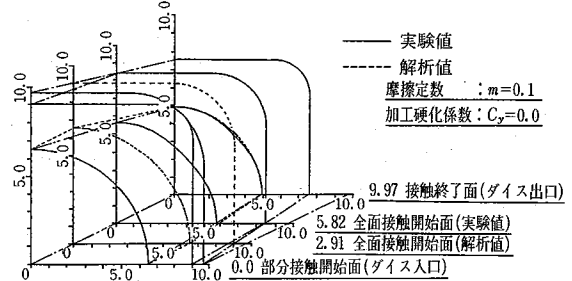


図15 全体の解析値と実験値

測値より円形に近いものの、ダイス出側(製品)内面形状をよくシミュレートできることが確かめられた。

5. ま と め

開発した異形(中空)材の引抜き加工汎用シミュレータは、矩形管を例に示したように、加工する製品の断面形状や加工力の予測に有効であり、将来の実操業における加工のスケジューリングの最適化や、ダイスの実質的なCADシステムの構成に十分応用できることを確認した。

(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
- 2) 木内・木村 昭和59年度塑性加工春季講演会, 416