

鍛造加工汎用シミュレータの開発 4

——らせん状部品の押出し・引抜き加工の解析——

Development of Forging Operation Relational Mutipurpose Simulator (FORMS) 4th Report

今井 敏 博*・木 内 学*・村 松 勁*・船 田 雅 之*
Toshihiro IMAI, Manabu KIUCHI, Tsuyoshi MURAMATSU and Masayuki FUNADA

1. は じ め に

筆者らは、鍛造加工の数値解析を簡便に行うために、鍛造加工汎用シミュレータ (FORMS)¹⁾の開発を進めている。これは、基本的な鍛造加工工程を対象とする、UBETに基づく基本解析モデルを、複雑な形状・寸法を有する被加工材の各部分にはめ込み、組み合わせ、相互に連立を図りつつ解析を行うシミュレータで、効率的かつ有効な解析が可能である。これまでに、FORMSを用いて、いくつかの非軸対称複合鍛造加工²⁾³⁾の解析を行い、有効な解析結果を得ている。今回、基本解析モデルの拡張の一環として、らせん状部品の押出し・引抜き加工の解析モデルの開発を行った結果について報告する。

本研究において、らせん状部品とは、図1に示すように、外表面もしくは内表面にらせん状の凹凸を有する棒または管であり、スクリューとかライフ管と呼ばれるものである。凹凸の形状はギアをはじめリブ、フィンなど多彩であり、ヘリカルギアや熱交換器用伝熱管など広範囲に使用されている。このようならせん状部品が、近年、押出し・引抜き加工により製造されるようになり、この加工法に関する解析のニーズが生じている。

らせん状部品の押出し・引抜き加工に関する解析例としては、Yangらが上界法を用いて、だ円断面を有するね

じれた棒の押出し加工を解析した例⁴⁾がある。本研究は、従来から用いられている一般化3次元動的可容速度場⁵⁾を拡張し、ギアもしくはフィン等の凹凸を有するらせん状棒または管の押出し・引抜き加工の解析を行う。

本報では、解析方法を示し、解析結果、および実測値との比較について報告する。なお、らせん状部品には棒と管があるが、本報では管の場合を例にとり説明する。

2. 解 析 方 法

2-1 解析対象

図2に示すように、被加工材の成形部全体を n 個に等分割した1個を解析対象とする (n は凹凸の条数)。らせん管の押出し・引抜きのように被加工材の回転を伴う加工の解析では、速度場は、 ϕ 方向の境界面において連続性を満たす必要がある。この要求を満たすために、本研究では、この境界面上での各方向速度 (少なくとも境界面垂直方向速度) が、周期性をもって定義された反対側の、または隣接する境界面における速度と同一になるように、境界面と速度場を設定する。これに対し、 ϕ 方向境界面を凹凸のねじれ角と同一またはそれに近い傾斜を有する曲面とし、この境界面に沿って被加工材が流れ、境界面を横切る流れは存在しないとするモデルを構成することも考えられるが、そのような境界面を、あらかじめ特定することは極めて困難であると考えられる。

今回用いたらせん管押出し・引抜き解析モデルを図3に示す。後述する速度場を用いる場合、 ϕ 方向の境界面として、中心軸を含みかつ y のみで表しうる ($\phi = \phi(y)$) 任意の平面もしくは曲面を採用することができるが、本研究では、簡単のため、次のように設定した。

$$\phi = \phi_0(y) = 0, \quad \phi = \phi_f(y) = 2\pi/n \quad (1)$$

また、この種の加工では、被加工材の内表面の成形と同時に、外表面が円錐面を持つ工具 (ダイ) により絞られ、外径あるいは断面積の減少がなされる場合が多い。ただし、本研究では、断面積の減少は、凹凸部分の加工のみによって起こるものとしていることに注意されたい。

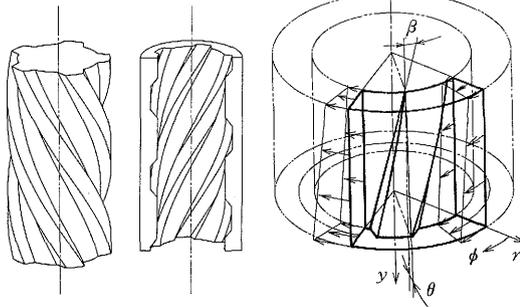


図1 らせん状棒および管

図2 解析対象

*東京大学生産技術研究所 第2部

なお、解析モデル (図 3) 中に 2 点鎖線で示した面は速度不連続面であり、ねじれた内部せん断面⁵⁾である。表面形状関数 r_{si} はすべて曲面モード⁶⁾とした。図 2 中の θ は押し (引抜き) 角 (Semicone angle), β はらせん状凹凸のねじれ角 (Helix angle) である。

2-2 動的可容速度場

この場合の動的可容速度場の構成に当たっては、すでに筆者らによって種々の応用が検討されている、一般化 3 次元動的可容速度場⁹⁾の応用を図る。この速度場は、①被加工材は剛塑性体であり、入口・出口の y 軸に垂直な断面が剛塑性境界である、②被加工材の y 方向速度 V_y は中心軸に垂直な平面内において一様である [$V_y = V_y(y)$]、③被加工材の任意の点の ϕ 方向速度 V_ϕ は中心軸からの距離に比例する [$V_\phi = r\omega(\phi, y)$]、といった仮定の基に構成されている。また、 V_ϕ の境界条件として、 ϕ 方向境界面に沿って被加工材は流れるとしている⁹⁾。

今回、被加工材のらせん状の流れを取り扱うために、 ϕ 方向境界面として単純に定義した平面を導入し、代わりにそれを通過する流れ (V_ϕ) を想定する。しかし、この境界面上における V_ϕ は一意的には決定できない。そこで、本研究では、 $\phi = \phi_0$ 境界面における、 V_ϕ の分布として、(2) 式を仮定する。式中の $f(y)$ は任意の関数であるが、ここでは y に関する 2 次関数とする。係数 a, b および c は未知係数であり、被加工材全体の仕事率に関する準独立変数と見なし、全仕事率の最小化を図り、速度場の最適化を行うことにより未知係数の最適値を決定する。最小化手法は F.P.S. 法を用いた。今回用いた速度場を (3) 式に示す。

$$V_\phi(r, \phi_0, y) = r\omega_0(\phi_0, y) = \frac{-r}{R(\phi_0, y)} f(y) \quad (2)$$

ただし、

$$f(y) = ay^2 + by + c,$$

$$R(\phi, y) = r_{s0}^2 - r_{si}^2(\phi, y)$$

$$V_y(r, \phi, y) = V_y(y) = V_0 \frac{\int_{\phi_0(y)}^{\phi_r(y)} R(\phi, 0) d\phi}{\int_{\phi_0(y)}^{\phi_r(y)} R(\phi, y) d\phi}$$

$$V_\phi(r, \phi, y) = r\omega(\phi, y) \quad (3)$$

$$= \frac{-r}{R(\phi, y)} \left[\int_{\phi_0(y)}^{\phi} \frac{\partial}{\partial y} \{R(\phi, y) V_y(y)\} f(y) dy \right]$$

$$V_r(r, \phi, y) = \frac{r_{s0}^2 - r^2}{2r} \left(\frac{\partial V_y(y)}{\partial y} + \frac{\partial \omega(\phi, y)}{\partial \phi} \right)$$

なお、 V_0 はダイス入口での被加工材流入速度、 r_{s0} は工具外径、 $r_{si}(\phi, y)$ は工具内表面の形状を表す関数である。

従来までの速度場⁹⁾に対し、下線部が追加されている。

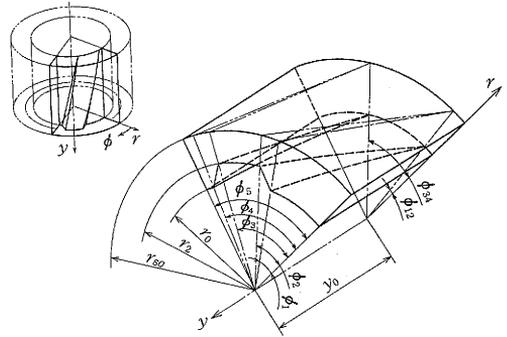


図 3 解析モデル

この下線部は、 $\phi = \phi_0(y)$ 境界面における V_ϕ の分布である。一方、 $\phi = \phi_r(y)$ 境界面における ϕ 方向速度 V_ϕ は (4) 式で表され、表面形状を表す関数 $R(\phi, y)$ が、両境界面において (5) 式を満たせば、(2) 式と一致し、 $\phi = \phi_0(y)$ および $\phi = \phi_r(y)$ の両境界において同一の速度分布が得られる。

$$V_\phi(r, \phi_r, y) = r\omega_0(\phi_r, y) = \frac{-r}{R(\phi_r, y)} f(y) \quad (4)$$

$$R(\phi_0, y) = R(\phi_r, y) \quad (5)$$

V_r についても、 V_ϕ と同様に、表面形状を表す関数 $R(\phi, y)$ が両境界面において (6) 式を満たせば、 $\phi = \phi_0(y)$ および $\phi = \phi_r(y)$ の両境界における速度の連続性は満足される。

$$\frac{\partial R(\phi_0, y)}{\partial \phi} = \frac{\partial R(\phi_r, y)}{\partial \phi}, \quad \frac{\partial R(\phi_0, y)}{\partial y} = \frac{\partial R(\phi_r, y)}{\partial y} \quad (6)$$

3. 解析結果 1 (相対圧力)

以上に示した解析モデルを用いて、らせん管押し・引抜き加工の解析を行った。表 1 は計算を行った条件を示したもので、ねじれ角 (β) の相対圧力 (p/σ) への影響の解析を中心に、押し出し角 (θ)、外径比 (r_{s0}/r_0) などを変化させて計算した。

表 1 解析条件

No.	r_{s0}/r_0	θ (°)	β (°)	m
CASE 1	1.3~2.1	45	30	0.0~1.0
CASE 2	1.3~2.1	45, 60	10~60	0.0, 1.0
CASE 3	1.3~2.1	15~60	30	0.0, 1.0
CASE 4	1.3	15~60	10~40	1.0

$r_{s0}/r_0 = 1.3 \sim 2.1$ は断面減少率 (red.) 26.4~5.6%

$\phi_0 = 0^\circ, \phi_r = 60^\circ, \phi_2 = 25^\circ, \phi_3 = 30^\circ, \phi_4 = 50^\circ, \phi_5 = 55^\circ$

$r_2/r_0 = 1.2, \bar{\sigma} = 1.0$

研 究 速 報

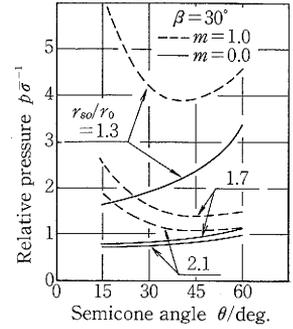
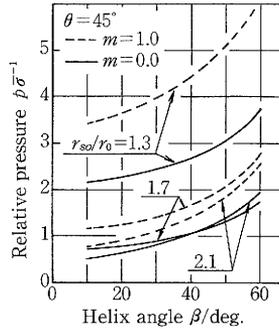
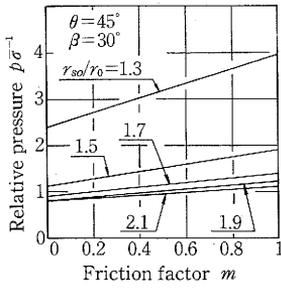


図 4 摩擦定数および外径比の相対圧力への影響 図 5 ねじれ角の相対圧力への影響 図 6 押し出し角の相対圧力への影響

3-1 摩擦定数 (m) および外径比 (r_{so}/r_0) の影響 (CASE 1)

まず外径比, 摩擦定数を変化させて計算を行った. その結果を図 4 に示す. 外径比が小さくなると, すなわち, 断面減少率が大きくなると, また, 摩擦定数が大きくなると相対圧力が増加する. この傾向は一般的な (非らせん) 押し出し・引抜き加工の結果と一致している.

3-2 ねじれ角 (β) の影響 (CASE 2)

次に, ねじれ角を変化させて計算を行った. その結果を図 5 に示す. ねじれ角の増加に伴い, 相対圧力は増加している. これは当然考えられることである.

ねじれ角の大きい範囲では, 外径比が大きいほうが相対圧力が高くなる傾向が認められる. この傾向は摩擦定数の小さいほうが顕著である. これは内部変形仕事率に対するねじりの影響による結果であり, 外径比の大きい被加工材では, ねじられる体積が多いためである. 事実, 外径比が大きい場合, 内部変形仕事率の増加が著しいことが確認された.

3-3 押し出し角 (θ) の影響 (CASE 3)

ねじれ角を固定し, 押し出し角を変化させた場合の結果を図 6 に示す. $m = 0$ では, 押し出し角が大きくなると相

対圧力は単に増加するだけだが, m の大きい範囲では, 押し出し角について相対圧力は最小値を持つ. この時の押し出し角を最適押し出し角 (θ_{OPT}) とする.

3-4 最適押し出し角 (θ_{OPT}) とねじれ角 (β) の関係 (CASE 4)

最適押し出し角に及ぼすねじれ角の影響を図 7 に示す. 図中の破線は各ねじり角ごとに求めた最適押し出し角を結んでおり, ねじれ角の変化による最適押し出し角の変化を示している. この結果から, ねじれ角が大きくなるに伴って最適押し出し角は大きくなるのがわかる.

4. 解析結果 2 (境界面角速度分布)

第 2 節解析方法で説明したように, ϕ 方向境界面 ($\phi = \phi_0$) における角速度分布 (ω_0) は (7) 式で表される. 最適化された速度場における, ω_0 の分布の一例を図 8 に示す. 図中の 1 点鎖線は, ϕ 方向境界面を凹凸のねじれ角 (β) と同一角度に設定し, 被加工材がこの境界面に沿って流れると仮定した場合の角速度分布である.

$$\omega_0 = \frac{-1}{R(\phi_0, y)} f(y) \tag{7}$$

4-1 境界面上での角速度 (ω_0)

図 8 より, 摩擦定数が小さいほうが境界面上での角速度 ω_0 は大きく, 被加工材は大きくねじれることがわか

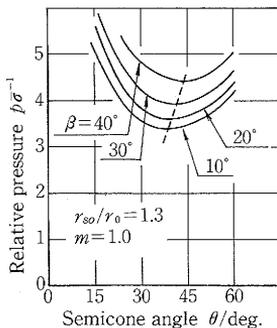


図 7 最適押し出し角とねじれ角の関係

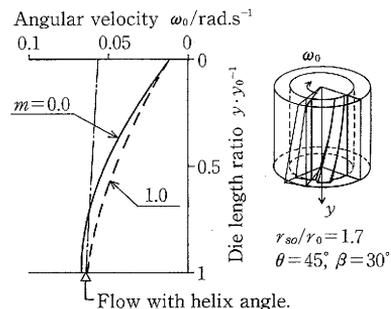


図 8 $\phi = \phi_0$ 境界面における角速度分布 ω_0 .

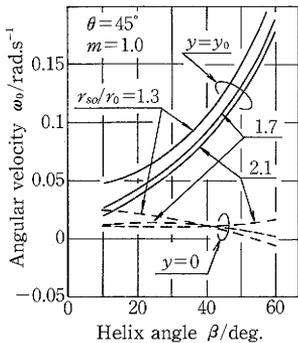


図9 ねじれ角の ω_0 への影響

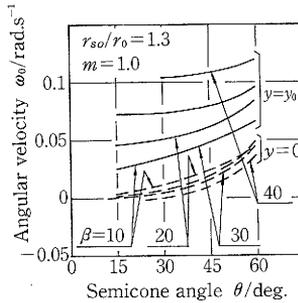


図10 押し出し角の ω_0 への影響

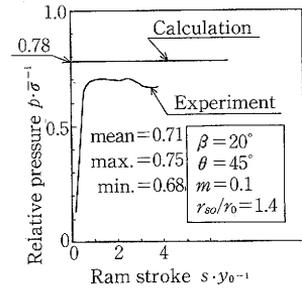


図11 実測値との比較 (相対圧力)

る。摩擦係数が大きくなると、工具面と被加工材外表面との摩擦の影響で被加工材のねじりが抑制されると考えられる。

入側 ($y = 0$) で ω_0 は 0 に近い。これは、素材は回転せずにダイスに入ると仮定していることを考えれば容易に納得できる。一方、出側 ($y = y_0$) では、 ω_0 は 1 点鎖線 (Δ) に近づいている。入側と同様に、被加工材はダイスから出た後、一定の角速度 (Δ) で回転しながら進むという仮定に起因している。これらの結果から、入側では成形部の被加工材の回転に伴って成形部の手前から回転が始まること、さらに加工を受けた被加工材のダイスから出た後の挙動が推定できる。実際には、スプリングバックやベアリング部による矯正があるために、最終製品のねじれ角を正確に予測するためには、もう少し細かい検討が必要となる。

4-2 ねじれ角 (β) の影響

図9はねじれ角と ω_0 の関係を示している。当然のことであるが、ねじれ角の増加に伴って、出側の ω_0 は急激に増加している。この傾向は外径比が変わっても同じである。入側では、0の近くを推移しているが、外径比の違いによりその挙動は異なる。外径比2.1では ω_0 は増加し、外径比1.5では減少している。そして、ねじれ角が60°では被加工材は逆に回転している。これは、断面減少率が高い上、ねじれ角が押し出し角より大きく、前方へ流れにくくなっていることなどにより、被加工材が工具の凸部で分流していると考えられることもできる。

4-3 押し出し角 (θ) の影響

図10は押し出し角の ω_0 への影響を示している。押し出し角の増加に伴って、入側・出側共に ω_0 は増加している。これは、むしろ押し出し角が小さいとダイス長さが大きく、摩擦面積が大きいため、被加工材のねじりが抑制されるためと考えられる。

5. 実験との比較

以上説明してきた解析モデルの妥当性を確認するため

に、らせん管の押し出し実験を行った。被加工材の降伏応力として、別途行った材料の圧縮試験から $\sigma = 62 \text{ kgf/mm}^2$ を得、この値を用いて実験における相対圧力を求めた。また、実験で用いている潤滑剤はボンダライト・ボンダリュベである。この潤滑剤の摩擦係数はリング圧縮試験の結果⁷⁾から $m = 0.1$ を得ているので、この値を用いて計算した。実測値と計算結果を比較して図11に示す。計算結果は実測値に比べ、わずかに高いものの、よい対応を示している。

以上、1条件での比較に過ぎないが、一応、本解析モデルの妥当性は確認された。

6. ま と め

本研究では、らせん管の押し出し・引抜き加工を対象とするUBETを用いた解析法を開発した。この方法は、筆者らが従来から用いてきた一般化3次元動的可容速度場を拡張し、 ϕ 方向の境界面に、 ϕ 方向の速度分布を仮定することにより、被加工材の回転の取り扱いを可能としたものである。この方法を用いて、らせん管の押し出し・引抜き加工について、ねじれ角および押し出し角等が相対圧力や被加工材のねじれに及ぼす影響を中心に解析を行い、多くの知見を得た。また、同時に行った実験結果と解析結果を比較し、本解析モデルは十分妥当性があることを確認した。
(1988年10月12日受理)

参 考 文 献

- 1) 木内学・村松勤・今井敏博：第37回塑加連講論，89。
- 2) 木内学・村松勤・今井敏博：昭62春塑加講論，459。
- 3) 木内学・村松勤・今井敏博：第38回塑加連講論，575。
- 4) Dong-Yol Yang・Moon-Uhn Kim・Choong-Hong Lee: Int. J. Mech. Sci., 20 (1978), 695。
- 5) 木内学・飯島茂男・星野倫彦：塑性と加工，29-325 (1988)，151。
- 6) 木内学・石川政和：塑性と加工，25-282 (1984)，604。
- 7) 木内学・今井敏博・鄭頭甲・柳本潤：塑性と加工，28-319 (1987)，841。