

鍛造加工汎用シミュレータの開発 5

——らせん状部品の押出し・引抜き加工の解析 2——

Development of Forging Operation Relational Mutipurpose Simulator (FORMS) 5th 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かつ効率的に行うために、UBETに基づく鍛造加工汎用シミュレータ (FORMS) の開発に関し、一連の研究を進めている^{1)~3)}。このシミュレータは、基本的鍛造加工に対応する解析モデルを、解析対象に合致するように、当てはめ、組み合わせ、相互に適合・連立を図りつつ解析を行うことを全体構想としている。本研究は、解析モデルの開発・応用を通して、FORMSの解析範囲の拡張を図るものである。

さて、前報⁴⁾では図1に示すらせん状部品のうち、管の場合、すなわち、管の内面にらせん状の凹凸を成形する押出し・引抜き加工の解析モデルを示した。この種の加工では、ダイまたはマンドレルが、自由にまたは強制的に回転する型構造を採用することにより、荷重の低減、加工の安定が図られることが多い。本研究では前報⁴⁾に示したらせん管押出し・引抜き加工の解析モデルを拡張し、型 (ダイ) を回転もしくは軸方向にスライドさせて荷重の低減を図る場合の解析を試みた。本報では、解析方法、各種解析例、実測値と比較した結果を示す。

2. 解析方法

本研究では、型 (ダイ) を回転もしくは軸方向にスラ

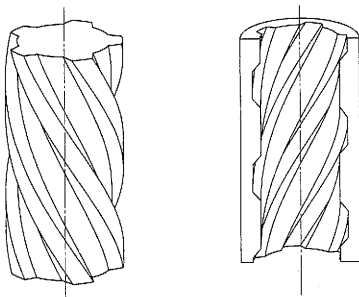


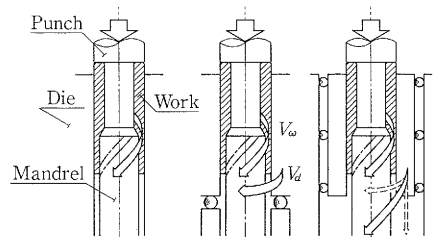
図1 らせん状棒および管

イドさせて荷重を低減させる場合の解析を行う。図2に示す3種類の型構造を想定し、解析モデルの構成を行った。図2(a)はダイを固定して加工する場合で、前報⁴⁾に示した解析モデルに対応する型構造である。これに対し、図2(b)はダイを回転のみさせる場合、図2(c)はダイに回転と軸方向のスライドを同時に与える場合を示している。以後、型固定方式、型回転方式、型回転スライド方式と呼ぶ。いずれも、被加工材内周部の凹凸を成形するマンドレルは固定としている。また、以降、特に断らない限り、型とはダイを指す。

各方式の解析上の取り扱いの違いは、被加工材外周部と型との間の摩擦仕事率の算出方法のみである。したがって、解析モデルおよび速度場については、前報⁴⁾で型固定の場合について詳細に述べているので、本報では概要のみ述べる。

2-1 解析対象

図3に示すように、被加工材成形部を n 個に等分割した1個 (n は凹凸の条数) を解析対象とする。本研究では、断面積 (軸直角) の減少は凹凸部分の加工のみにより成されるとしており、被加工材外周部の半径の変化はない。 ϕ 方向の境界については $\phi_0(y) = 0$ 、 $\phi_f(y) = 2\pi/n$ といった簡単な平面を境界とし、被加工材の回転を取り扱うために、この境界面を通過する流れ (ϕ 方向速度) を



(a) Fixed die (b) Rotary die (c) Rotary & sliding die

図2 らせん管押出し加工の型構造

*東京大学生産技術研究所 第2部

研究速報

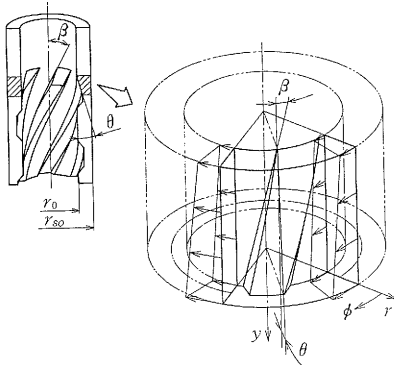


図3 解析モデル

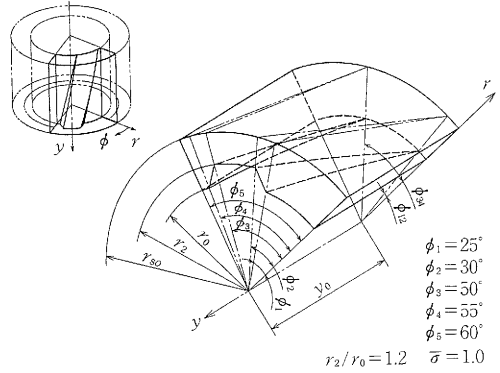


図4 基本形状および記号

仮定する。なお、この仮定した ϕ 方向速度は、全仕事率の最小化を図ることにより、最適化される。

2-2 動的可容速度場

本研究で用いている動的可容速度場を式(1)に示す。これは、従来から用いられている一般化3次元動的可容速度場を応用したもので、 V_ϕ 中の $f(y)$ に関する項が付け加えられている。 $\phi = \phi_0$ で、 V_ϕ は式(2)となり、 $f(y)$ の項が ϕ 方向境界面における ϕ 方向速度分布に相当することがわかる。また、この $\phi = \phi_0$ における V_ϕ は、他方の境界面 $\phi = \phi_r$ における V_ϕ と一致しており、この速度場は、周期性をもって定義された解析モデルの境界において、境界面垂直速度の連続性が満たされていることがわかる。 $f(y)$ は任意の関数で与えうるが、本研究では y に関する2次関数とする。係数 a, b, c は、全仕事率に関する準独立変数と見なし、全仕事率の最小化により、決定する。

$$V_y(r, \phi, y) = V_y(y) = V_0 \frac{\int_{\phi_0(y)}^{\phi_r(0)} R(\phi, 0) d\phi}{\int_{\phi_0(y)}^{\phi_r(y)} R(\phi, y) d\phi} \quad (1)$$

$$V_\phi(r, \phi, y) = r\omega(\phi, y) = \frac{-r}{R(\phi, y)} \left[\int_{\phi_0(y)}^{\phi} \frac{\delta}{\delta y} \{R(\phi, y) V_y(y)\} d\phi + f(y) \right]$$

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

ただし、 $f(y) = ay^2 + by + c$

$$R(\phi, y) = r_{s0}^2 - r_{s1}^2(\phi, y)$$

V_0 : 成形部入口での被加工材流入速度

r_{s0} : ダイ内径

r_{s1} : マンドレル外表面の形状を表す関数

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

2-3 型(ダイ)の回転およびスライドの取り扱い

上述のように、図2に示した各方式の解析上の取り扱い

いの違いは、摩擦仕事率の算出方法のみである。摩擦仕事率は式(3)で求めるが、ここで、被加工材外周部と型の相対速度 ΔV_f を求める際、それぞれの方式に対応する型の速度 V_d を用いる。

$$\dot{W}_f = \int_s m / \sqrt{3} \bar{\sigma} |\Delta V_f| ds \quad (3)$$

ただし、 $\Delta V_f = V_w - V_d$

V_w : 被加工材の速度、 V_d : 型の速度

$\bar{\sigma}$: 相当応力、 m : 摩擦定数

ここで、 V_d に任意の値を設定すると、型の強制回転もしくは強制スライドによる加工の解析となる。これに対し、 V_d を未知数とし、全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ると、 V_d の最適値(V_{opt})が求まる。型の回転もしくはスライド速度の最適値を知ることが、型設計において有意義である。

ただし、被加工材の加工に要するエネルギー以外の、型を回転またはスライドさせるために必要なエネルギーは無視している。

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、らせん管の押し出し加工の解析を行った。図4に示す形状を基本とし、摩擦定数(m)、ねじれ角(β)、押し出し角(θ)等を変えて計算した。

3-1 最適型回転速度

図5は、型回転方式の場合の、型回転速度と相対圧力の関係を示している。ここで、型回転速度 $V_d = 0$ は型固定方式と同じ条件である。図中○印は、相対圧力の最小値を示している。この結果より、型に適正な回転を与えると、相対圧力が低下することが確認できる。相対圧力が最小になる型回転速度が最適型回転速度(V_{opt})である。図中、破線で示した速度は被加工材の出側の回転速度であり、最適型回転速度はこの速度の70~80%であることがわかる。

以下に、種々加工条件を変えた場合の相対圧力に関する解析結果を示すが、いずれも型回転速度が最適である場合の結果である。

3-2 摩擦定数 (m) の影響

摩擦定数を変化させて相対圧力を求めた結果を図 6 に示す。各方式共、m の増加とともに、ほぼ直線的に相対圧力は増加している。型固定方式、型回転方式、型回転スライド方式の、順に相対圧力は低くなっている。

型回転方式、型回転スライド方式の効果は、型固定方式の結果からの相対圧力の低下量で評価されると考えられる。当然の結果であるが、m が大きくなるに従って、各方式の効果が大きくなることわかる。

3-3 ねじれ角 (β) の影響

図 7 はねじれ角 (β) と相対圧力の関係を示している。ねじれ角の小さい範囲では、型回転方式の効果はあまり

無いが、ねじれ角が大きくなるに従って、その効果は大きくなっている。また、型回転スライド方式の相対圧力は、ほぼ一定量だけ型回転方式の結果より低く、型を軸方向にスライドさせることによる相対圧力の低下は、ねじれ角にあまり関係ないことがわかる。

3-4 押し出し角 (θ) の影響

図 8 は、押し出し角を変化させて、各方式の相対圧力を求めた結果である。図より、型回転方式の相対圧力は、押し出し角に関係なく、型固定方式の結果より一定量だけ低い。一方、型回転スライド方式は、押し出し角が小さくなるに従って、その効果が大きくなっている。これは、押し出し角が小さいと成形部長さ (y₀) が長く、摩擦面積が大きくなるため、スライド方式による摩擦仕事率の低減が大きくなるものと考えられる。なお、図中の○印は押し出し角に関する相対圧力の最小値を示しており、その角度は、この条件における最適押し出し角である。

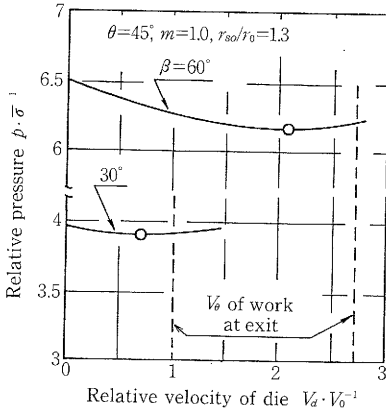


図 5 型回転速度と相対圧力の関係

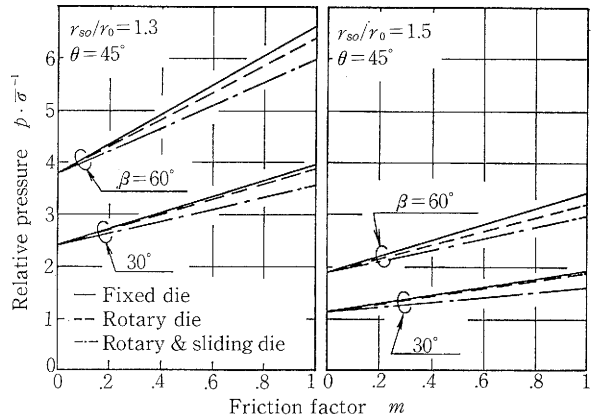


図 6 摩擦定数の相対圧力への影響

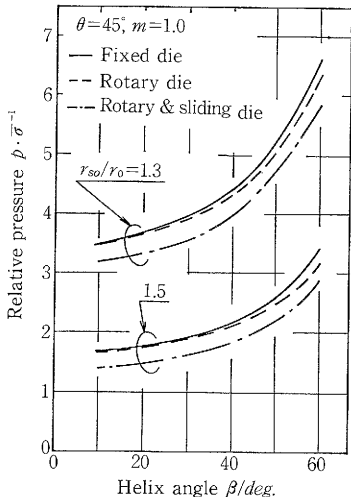


図 7 ねじれ角の相対圧力への影響

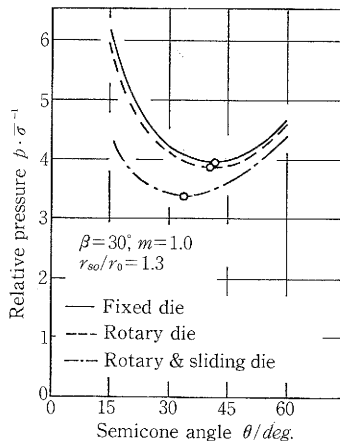


図 8 押し出し角の相対圧力への影響

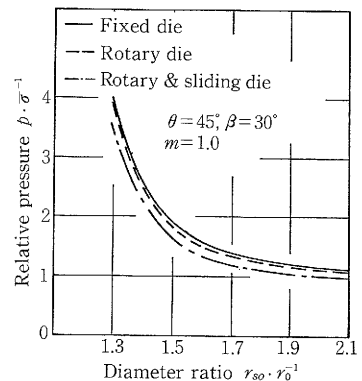


図 9 外径比の相対圧力への影響

研

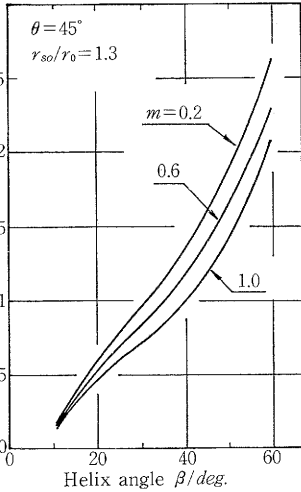


図10 ねじれ角と最適型回転速度の関係

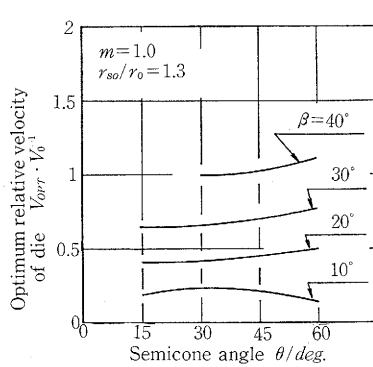


図11 押し出し角と最適型回転速度の関係

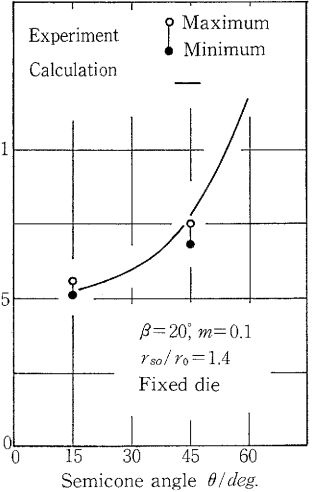


図12 解析結果と実測値との比較

3-5 外径比 (r_{so}/r_0) の影響

図9は、外径比を変化させて、各方式の相対圧力を求めた結果である。この図より、型回転方式、型回転ライド方式、いずれも相対圧力は型固定方式の結果より一定量低い。各方式の効果に対する外径比の影響は小さいと言える。

4. 解析結果2 (最適型回転速度)

相対圧力を最小にする型の最適回転速度 (V_{opt}) に及ぼすねじれ角、押し出し角の影響を以下に示す。ただし、以下の結果はすべて型回転方式の場合である。

4-1 ねじれ角 (β) の影響

図10は、ねじれ角と最適型回転速度 (V_{opt}) 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 V_{opt} は増加している。また、 m の増加に伴って V_{opt} は小さくなっている。これは、 m が大きい場合、摩擦損失を抑制するために被加工材の回転速度が小さくなる⁴⁾ ことに対応していると考えられる。

4-2 押し出し角 (θ) の影響

図11は、 V_{opt} に及ぼす押し出し角の影響を示している。この図より、ねじれ角の小さい ($\beta=10^\circ$) 場合を除いて、押し出し角の増加に伴い V_{opt} は増加している。しかし、その変化はわずかであり、 V_{opt} に対しては、押し出し角よりもねじれ角による影響が支配的であるといえる。

5. 実測値との比較

らせん管押し出し・引抜き加工の解析モデルの妥当性について確認するために、一連の実験を進めている。本報では型固定方式にて、押し出し角だけを変化させた場合 ($\theta=15^\circ, 45^\circ$) について実測値と計算結果を比較して示

す。実験条件は前報⁴⁾ に示した条件と同一で、潤滑剤はボンデライト+ボンダリユーベ、被加工材はSCr415 (降伏応力 62kgf/mm^2) を用いた。

結果を図12に示す。実測値はわずかにばらつきが生じており (実験数15)、図にはその最大値と最小値を示している。この結果より、2種類の押し出し角について、計算結果は実測値と良い対応を示しており、本解析モデルの妥当性は確認されたといえる。

6. ま と め

本研究では、前報に示したらせん管押し出し・引抜き加工の解析モデルを応用し、型 (ダイ) を回転もしくは軸方向にスライドさせて、加工荷重を低減させる場合の解析を試みた。その結果、型回転の効果 (相対圧力の低下) は摩擦定数、ねじれ角の大きいほうが、型スライドの効果は押し出し角の小さいほうが顕著であることを確認した。また、最適型回転速度は、ねじれ角の増加に伴って増加し、押し出し角の減少、摩擦定数の増加に伴ってわずかに減少することが確認された。

また、解析モデルの妥当性を確認するために、型固定方式にて2種類の押し出し角について、計算結果と実測値を比較した。その結果、両者は良い対応を示し、本解析モデルは十分妥当性があることが確認された。

(1989年1月11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) 今井敏博・木内学・村松勤・船田雅之：昭63春塑加講論，573。