

棒・管材の複合加工の研究 — 押し込み曲げ加工の解析 —

Study on Compound Forming of Bar and Pipe

木 内 学*・石 川 政 和*
Manabu KIUCHI and Masakazu ISHIKAWA

1. はじめに

円管の曲げ加工には種々の方法があるが、製品の肉厚を均一にできる曲げ加工法としては、ハンブルグ式曲げ加工法が唯一実用的な技術と思われる。この方法は、曲がり円錐状のマンドレルに材料を押し込み、拡管しながら曲げる方法である。本研究は、このハンブルグ式曲げ加工の解析を最終目的としている。本報では、その前段階として、棒材の絞り曲げ加工、角パイプの拡管曲げ加工の解析を可能とする三次元速度場を、それぞれ提案し、その速度場を使用して、2, 3の例について計算したので、その結果を報告する。

2. 丸棒の絞り曲げ加工の解析

(2-1) 三次元的可容速度場

図1に円柱座標系における丸棒の絞り曲げ加工時の幾何学的関係を示す。以下、使用記号は図を参照されたい。三次元的可容速度場を求めるにあたり、次の仮定を用いた。

〔仮定1〕 v_ϕ は y 方向には一様で、 r 方向には次の(1)式のような分布を持つ。

$$v_\phi(r, \phi) = \left\{ 1 + \frac{\phi}{\phi_1} \left(\frac{r}{Rn} - 1 \right) \right\} v_\phi(Rn, \phi) \quad (1)$$

〔仮定2〕 v_r は(2)式の様な関数で表わされるものとする。

$$v_r(r, \phi, y) = y^2 \cdot \chi(r, \phi) + F(r, \phi) \quad (2)$$

〔仮定1〕から押し出し方向の速度成分 $v_\phi(r, \phi)$ は(3)式ようになる。また、体積一定の条件、〔仮定2〕、および材料がダイス表面に沿って流れるという境界条件から r 方向、 y 方向の速度成分は(4)、(5)式のようになる。

$$v_\phi(r, \phi) = \left\{ 1 + \frac{\phi}{\phi_1} \left(\frac{r}{Rn} - 1 \right) \right\} \frac{A}{(RO(\phi) - Rn)^2} \quad (3)$$

ただし、 $A = v_0 \{ RO(0) - Rn \}^2$

$$v_r(r, \phi, y)$$

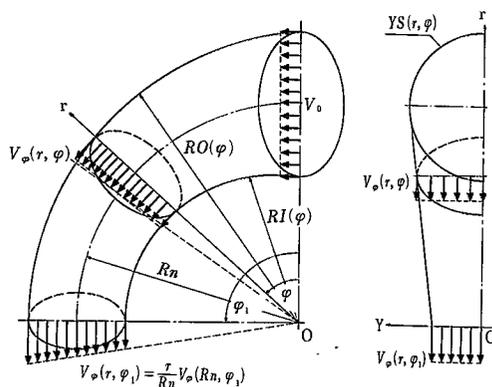


図1 ダイス面の円柱座標表示

$$\begin{aligned} &= \frac{Ay^2}{Rn \cdot r \cdot (RO(\phi) - Rn)^2} \left\{ \frac{\phi}{\phi_1} \frac{\partial RO(\phi)}{\partial \phi} (RO(\phi) - Rn) + \frac{1}{\phi_1} \right\} \\ &+ \left\{ 1 + \frac{\phi}{\phi_1} \left(\frac{r}{Rn} - 1 \right) \right\} \frac{A \frac{\partial RO(\phi)}{\partial \phi}}{(RO(\phi) - Rn)^3} \frac{(r - Rn)}{r} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{Ay}{r(RO(\phi) - Rn)^2} \left\{ \frac{\partial RO(\phi)}{\partial \phi} (RO(\phi) - Rn) - \frac{1}{\phi_1} \left(\frac{r - Rn}{Rn} \right) \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

(2-2) 計算結果

以下に数値計算例を示す。図中 m は摩擦定数、 r は減面率を表す。また、押し出し加圧力は素材の変形抵抗で無次元化してある。図2に曲げ半径 Rn 、ダイス曲げ角 ϕ_1 を一定として、減面率を変化させた場合の無次元化押し出し加圧力の変化を示す。図中実線は本速度場を使用して求めた結果を、また破線は Avitzur¹⁾ による円錐ダイを通す軸対称押し出しの上界値を示す。図2から、減面率が大きくなるに従って無次元化押し出し加圧力は大きくなることわかる。また、絞り曲げ加工と円錐ダイによる加工の無次元化押し出し加圧力の差は、減面率が大きくなる

* 東京大学生産技術研究所 第2部

研 究 速 報

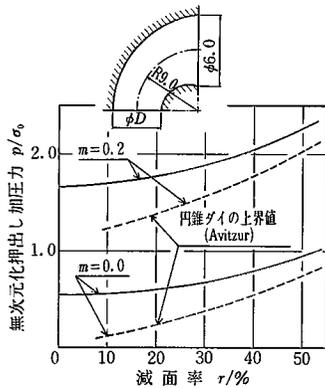


図2 絞り曲げ加工における減面率と加圧力の関係

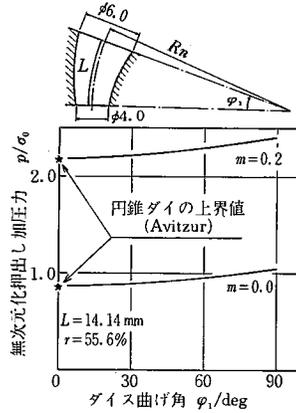


図3 絞り曲げ加工におけるダイス曲げ角と加圧力の関係

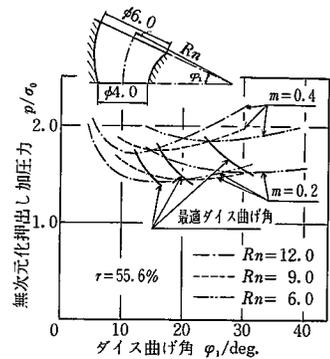


図4 曲げ半径の変化による最適ダイス曲げ角の変化

に従って減少することがわかる。図3にダイス長さ L と、減面率 r を一定として、ダイス曲げ角 ϕ_1 を変化させた場合の無次元化押し出し加圧力の変化を示す。図中★印は、ダイス長さ L の等しい円錐ダイによる加工の上界値である。図3から、ダイス曲げ角 ϕ_1 が小さくなるに従って(円錐ダイに近づくに従って)、無次元化押し出し加圧力は徐々に減少し、★印の値に近づくことがわかる。図4に減面率 r を一定として、曲げ半径 Rn や摩擦定数 m が異なる場合のダイス曲げ角 ϕ_1 に対する無次元化押し出し加圧力の変化、並びに曲げ半径 Rn による最適ダイス曲げ角(最適ダイス曲げ角とは無次元化押し出し加圧力が最小となるようなダイス曲げ角とする)の変化を示す。図4から、曲げ半径が大きいくほど、最適ダイス曲げ角は小さくなることがわかる。図5に曲げ半径 Rn を一定として、減面率 r や摩擦定数 m が異なる場合のダイス曲げ角 ϕ_1 に対する無次元化押し出し加圧力の変化、並びに減面率による最適ダイス曲げ角の変化を示す。図5から、減面率が大きいくほど、また摩擦定数が小さいほど、最適ダイス曲げ角は大きくなることがわかる。

3. 角パイプの拡管曲げ加工の解析

(3-1) 三次元的可容速度場

図6に円柱座標系における角パイプの拡管曲げ加工時の幾何学的関係を示す。以下、使用記号は図を参照されたい。今回の解析においては、角パイプを対称面をはさんで5個の領域に分割した。また、パイプの内側はマンドレルに、パイプの外側は出側・入側の境界条件と仕事率最小の条件によって求まる架空のダイス表面によって拘束される。分割面上では、分割面に垂直な方向の速度の連続性は保持されるが、平行な方向では相対びりが発生する。また、隣り合う領域間では、この分割面を通して材料の流入・流出が起こる。三次元的可容速度場を

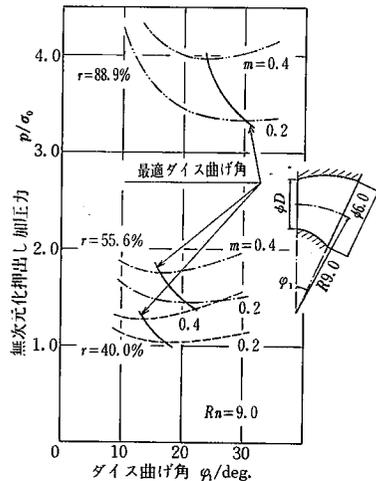


図5 減面率の変化による最適ダイス曲げ角の変化

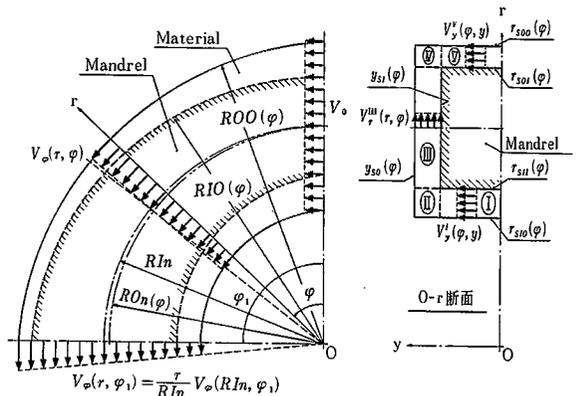


図6 マンドレルおよび素材の円柱座標表示

表 1 角パイプ拡管曲げ加工の三次元的可容速度場一覽表

領域	動的 可 容 速 度 場
(I) (V)	$v_{\varphi}(r, \varphi) = \left\{ 1 + \frac{\varphi}{\varphi_1} \left(\frac{r}{RIn} - 1 \right) \right\} \frac{A}{D(\varphi)}$
(I)	$v_r^I(r, \varphi) = \frac{1}{r} \left[\frac{(r_{s10} - r)(r - r_{s11})}{(r_{s10} + r_{s11})} B(\varphi) + \frac{(r_{s10}^2 - r^2)}{(r_{s10}^2 - r_{s11}^2)} v_{\varphi}(r_{s11}, \varphi) \frac{\partial r_{s11}}{\partial \varphi} + \frac{(r^2 - r_{s11}^2)}{(r_{s10}^2 - r_{s11}^2)} v_{\varphi}(r_{s10}, \varphi) \frac{\partial r_{s10}}{\partial \varphi} \right]$ $v_y^I(r, \varphi) = F(\varphi) \cdot y = \left[-E(\varphi) + \frac{2B(\varphi)}{(r_{s10} + r_{s11})} + \frac{2}{(r_{s10}^2 - r_{s11}^2)} \left\{ v_{\varphi}(r_{s11}, \varphi) \frac{\partial r_{s11}}{\partial \varphi} - v_{\varphi}(r_{s10}, \varphi) \frac{\partial r_{s10}}{\partial \varphi} \right\} \right] y$
(II)	$v_r^{II}(r, \varphi) = \frac{1}{r} \left[\frac{y_{s1}(r^2 - r_{s10}^2)}{2(y_{s0} - y_{s1})} F(\varphi) - \frac{(r - r_{s10})K(\varphi)}{(y_{s0} - y_{s1})} \left\{ \frac{(r + r_{s10})}{2} H(\varphi) + J(\varphi) \right\} - (r - r_{s10}) \left\{ \frac{(r + r_{s10})}{2} E(\varphi) - B(\varphi) \right\} + v_{\varphi}(r_{s10}, \varphi) \frac{\partial r_{s10}}{\partial \varphi} \right]$ $v_y^{II}(r, \varphi, y) = \frac{(y_{s0} - y)y_{s1}}{(y_{s0} - y_{s1})} F(\varphi) + \frac{(y - y_{s1})v_{\varphi}(r, \varphi)}{(y_{s0} - y_{s1})r} K(\varphi)$
(III)	$v_r^{III}(r, \varphi) = \left[\left(\frac{\partial RIO}{\partial \varphi} - \frac{\partial ROO}{\partial \varphi} + \frac{\partial RON}{\partial \varphi} \right) \frac{1}{(y_{s0} - y_{s1})} \left\{ \frac{r}{2} H(\varphi) + J(\varphi) \right\} - \left\{ \frac{r}{2} E(\varphi) - B(\varphi) \right\} + \frac{C32}{r} \right]$ $v_y^{III}(r, \varphi, y) = v_{\varphi}(r, \varphi) \frac{1}{r} \left[\frac{(y_{s0} - y)}{(y_{s0} - y_{s1})} \frac{\partial RIO}{\partial \varphi} + \frac{(y - y_{s1})}{(y_{s0} - y_{s1})} K(\varphi) \right]$ $C32 = \frac{y_{s1}(r_{s11}^2 - r_{s10}^2)}{2(y_{s0} - y_{s1})} F(\varphi) + \frac{r_{s10} \cdot K(\varphi)}{(y_{s0} - y_{s1})} \left\{ \frac{r_{s10}}{2} H(\varphi) + J(\varphi) \right\} + r_{s10} \left\{ \frac{r_{s10}}{2} E(\varphi) - B(\varphi) \right\} + v_{\varphi}(r_{s10}, \varphi) \frac{\partial r_{s10}}{\partial \varphi} - \frac{\partial RIO}{\partial \varphi} \frac{r_{s11}}{(y_{s0} - y_{s1})} \left\{ \frac{r_{s11}}{2} H(\varphi) + J(\varphi) \right\}$
(IV)	$v_r^{IV}(r, \varphi) = \frac{1}{r} \left[\frac{y_{s1}(r^2 - r_{s00}^2)}{2(y_{s0} - y_{s1})} G(\varphi) - \frac{(r - r_{s00})K(\varphi)}{(y_{s0} - y_{s1})} \left\{ \frac{(r + r_{s00})}{2} H(\varphi) + J(\varphi) \right\} - (r - r_{s00}) \left\{ \frac{(r + r_{s00})}{2} E(\varphi) - B(\varphi) \right\} + v_{\varphi}(r_{s00}, \varphi) \frac{\partial r_{s00}}{\partial \varphi} \right]$ $v_y^{IV}(r, \varphi, y) = \frac{(y_{s0} - y)y_{s1}}{(y_{s0} - y_{s1})} G(\varphi) + \frac{(y - y_{s1})}{(y_{s0} - y_{s1})} \frac{v_{\varphi}(r, \varphi)}{r} K(\varphi)$
(V)	$v_r^V(r, \varphi) = \frac{1}{r} \left[\frac{(r_{s00} - r)(r - r_{s01})}{(r_{s00} + r_{s01})} B(\varphi) + \frac{(r_{s00}^2 - r^2)}{(r_{s00}^2 - r_{s01}^2)} v_{\varphi}(r_{s01}, \varphi) \frac{\partial r_{s01}}{\partial \varphi} + \frac{(r^2 - r_{s01}^2)}{(r_{s00}^2 - r_{s01}^2)} v_{\varphi}(r_{s00}, \varphi) \frac{\partial r_{s00}}{\partial \varphi} \right]$ $v_y^V(r, \varphi) = G(\varphi) \cdot y = \left[-E(\varphi) + \frac{2B(\varphi)}{(r_{s00} + r_{s01})} + \frac{2}{(r_{s00}^2 - r_{s01}^2)} \left\{ v_{\varphi}(r_{s01}, \varphi) \frac{\partial r_{s01}}{\partial \varphi} - v_{\varphi}(r_{s00}, \varphi) \frac{\partial r_{s00}}{\partial \varphi} \right\} \right] y$
	$A = v_0 \{ ROO(0) - RON(0) \}^2 - \{ RIO(0) - RIn \}^2, B(\varphi) = \frac{A}{D} \left\{ \frac{1}{\varphi_1} + \frac{M}{D} \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_1} \right) \right\}$ $D(\varphi) = \left\{ 1 + \frac{\varphi}{\varphi_1} \left(\frac{RON}{RIn} - 1 \right) \right\} \{ ROO - RON \}^2 - \{ RIO - RIn \}^2, E(\varphi) = \frac{A}{D \cdot \varphi_1 \cdot RIn} \left(1 - \frac{M}{D} \varphi \right)$ $H(\varphi) = \frac{A}{D} \frac{\varphi}{\varphi_1} \frac{1}{RIn}, J(\varphi) = \frac{A}{D} \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_1} \right), K(\varphi) = \left(\frac{\partial ROO}{\partial \varphi} - \frac{\partial RON}{\partial \varphi} \right)$ $M(\varphi) = \left\{ \frac{1}{\varphi_1} \left(\frac{RON}{RIn} - 1 \right) + \frac{\varphi}{\varphi_1} \frac{1}{RIn} \frac{\partial RON}{\partial \varphi} \right\} \{ ROO - RON \}^2 + 2 \left\{ 1 + \frac{\varphi}{\varphi_1} \left(\frac{RON}{RIn} - 1 \right) \right\} \{ ROO - RON \} K(\varphi) - 2 \{ RIO - RIn \} \frac{\partial RIO}{\partial \varphi}$

求めるにあたり、次の仮定を用いた。

〔仮定 1〕 v_{φ} は y 方向には一様で、 r 方向には次の (6) 式のような分布を持つ。

$$v_{\varphi}(r, \varphi) = \left\{ 1 + \frac{\varphi}{\varphi_1} \left(\frac{r}{RIn} - 1 \right) \right\} v_{\varphi}(RIn, \varphi) \quad (6)$$

〔仮定 2〕 任意の角度の切断面上において、板厚に垂直な方向の速度は一様である。

〔仮定 1〕 から押し出し方向の速度成分 $v_{\varphi}(r, \varphi)$ は (7) 式ようになる。また、体積一定の条件、〔仮定 2〕 および材料がマンドレル表面および架空のゲイス表面に沿って流れるという境界条件からそれぞれの領域の r 方向、 y 方向の速度成分は (8) ~ (17) 式ようになる。

(7) ~ (17) 式を表 1 に示す。

(3-2) 計算結果

以下に数値計算例を示す。図中 m は摩擦数、 α はマ

ンドレルの拡管率を示す。 α は (18) 式で定義する。

$$\alpha = \left\{ \frac{\text{出側の周長}}{\text{入側の周長}} - 1 \right\} \times 100 \quad (18)$$

ΔT は肉厚変化率を示し、(19) 式で定義する。

$$\Delta T = \left\{ \frac{\text{(加工後肉厚)}}{\text{(加工前肉厚)}} - 1 \right\} \times 100 \quad (19)$$

図 7 に $m=0.0$ としてマンドレル長さ L (中心線の弧長) を一定として、曲げ半径 RIn に対する無次元化押し出し加圧力の変化ならびに背側・腹側の肉厚の変化を示す。図中、実線は本速度場を使用して求めた結果、破線は F. J. Fucks Jr.²⁾ による導波管 (角管) の引き曲げ加工による肉厚変化のデータである。図 7 から、本速度場による肉厚変化の結果と導波管の引き曲げ加工による肉厚変化の結果は、ほぼ同様な傾向を示すが、数値的 (増肉率・減肉率の絶対値) には本解析の値の方がやや大きめであ

研究速報

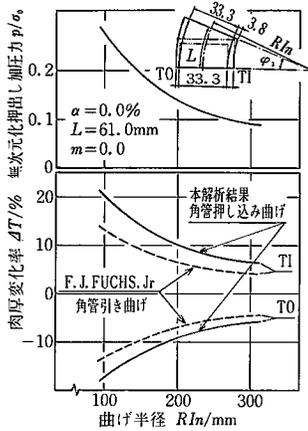


図7 曲げ半径と加圧力および肉圧変化の関係 (角管との比較)

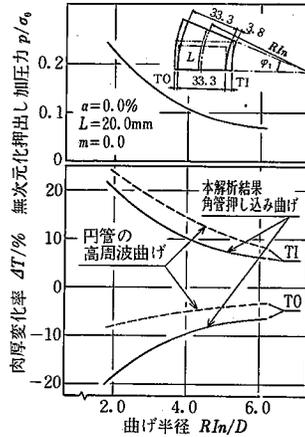


図8 曲げ半径と加圧力および肉圧変化の関係 (円管との比較)

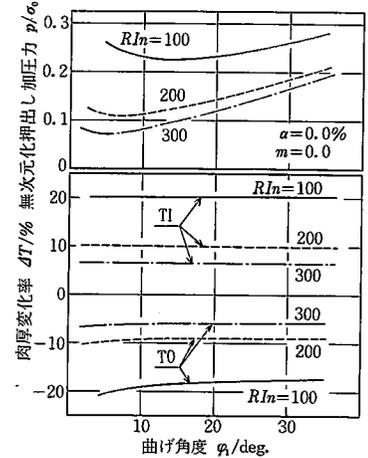


図9 曲げ半径および曲げ角度と加圧力および肉厚変化の関係

ることがわかる。図8にマンドレル長さ L だけを短かくし他の条件は図7と同一とした場合の肉厚変化率と円管の高周波曲げ加工による肉厚変化率³⁾の比較を示す。図中、実線は本速度場を使用して求めた結果、破線は円管の高周波曲げ加工のデータである。図8から、本速度場による肉厚変化の結果は円管の高周波曲げ加工の結果より背側・腹側とも全体的に薄いことがわかる。

図9に $m=0.0$ として曲げ半径とマンドレル長さ L (曲げ角度 ϕ_1)を変化させた場合の無次元化押し加圧力および背側・腹側の肉厚変化を示す。図9から、無次元化押し加圧力を最小とするような曲げ角度 ϕ_1 が存在し、曲げ半径が小さいほどこの角度 ϕ_1 は大きくなることがわかる。また、曲げ角度による肉厚の変化は腹側では、ほとんどないが、背側においては、曲げ角度が小さくなるに従って減肉率が大きくなる。図7～9ではマンドレルの拡管率が0%の場合の結果 (すなわち同径曲げ)を示したや、図10では拡管曲げの結果を示す。図10に曲げ半径および曲げ角度を一定として、拡管率および摩擦定数を変化させた場合の無次元化押し加圧力および背側・腹側の肉厚の変化を示す。図中★印は円管の拡管曲げの実測データである。図10から、本計算による肉厚変化と実測データは、背側より腹側の方が厚いという傾向は同じであるが、肉厚変化の幅は計算値の方が大きいことがわかる。

4. まとめ

(i) (3)～(5)式で提案した三次元速度場の使用によって、棒材の絞り曲げ加工の上界法による解析が可能となった。

(ii) (7)～(17)式で提案した三次元速度場の使用によって、角管の拡管曲げ加工の上界法による解析が可

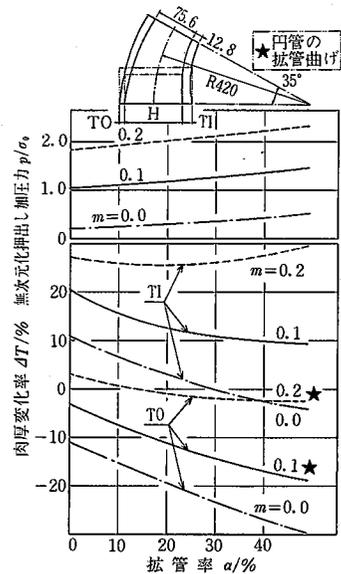


図10 拡管率の変化による加圧力および肉厚変化率の変化

能となった。また、本解析を円管の拡管曲げ加工のシミュレーションとして考えた場合、定性的には、ほぼ良い一致を示したが、定量的には問題が多少あると思われる。今後、さらに検討を進める予定である。

(1982年4月12日受理)

参考文献

- 1) B. Avitzur: Metal Forming; Process and Analysis (1968) 153, McGraw Hill
- 2) F.J. Fuchs Jr.: The Bell System Technical Journal (1959), 1457
- 3) 原ほか: 「高周波誘導加熱による管曲げ加工」三菱重工技報 Vol.5 No.1