

交差穿孔圧延の数値シミュレーション

大同工業大学 工学部 機械工学科 先端機械工学専攻
准教授 小森和武
(平成 17 年度研究開発助成 AF-2005011)

キーワード: 交差穿孔圧延, プラスティシン

1. 研究の目的と背景

継目無鋼管を製造するためには、次の三種類の圧延機を用いる必要がある。すなわち、まず穿孔圧延機により材料を穿孔する。次に、延伸圧延機により材料を伸ばしながら材料の肉厚を薄くする。そして最後に、絞り圧延機により材料を絞りながら材料の形状を整える。

ここで、材料を穿孔するためには、次の三種類の穿孔圧延機がある。すなわち、プッシャを必要とするプレスロール穿孔圧延機、円柱型(正確にはバレル型)のロールを用いるマンネスマン穿孔圧延機、そして円錐型(コーン型)のロールを用いる交差穿孔圧延機がある。

プレスロール穿孔圧延では、他の穿孔圧延では必要としないプッシャが必要である。マンネスマン穿孔圧延では、材料の横断面内のせん断ひずみが非常に大きい。一方、交差穿孔圧延では、材料の横断面内のせん断ひずみが比較的小さい。

現在最も優れた穿孔圧延であると言われている、交差穿孔圧延の材料変形機構を解析的に明らかにしたい。すなわち、様々な加工条件が様々な圧延特性に及ぼす影響を数値シミュレーションにより明らかにしたい。

ここで、交差穿孔圧延に関する実験的研究は比較的少なく、解析結果の妥当性を確認するために利用できる実験結果がほとんど無い。そこで、プラスティシン(油粘土)を用いて交差穿孔圧延の実験を行いたい。

2. 研究方法

2.1 実験材料

熱間鋼を用いて交差穿孔圧延の実験を行うためには、膨大な設備が必要であり、熱間鋼を用いて交差穿孔圧延の実験を行うことは適切ではない。そこで、常温においてその応力-ひずみ曲線が熱間鋼の応力-ひずみ曲線とよく似ている¹⁾、プラスティシン(油粘土)を用いて、交差穿孔圧延の実験を行った。

交差穿孔圧延の実験を容易に行えるように、また試験片形状を容易に測定できるように、試験片の直径を 30mm にした。また、試験片からひずみを求めるために、必要に応じて試験片をマジックインクで着色した。試験片と工具の間の潤滑のために炭酸カルシウムを用いた。実験温度を 20℃にした。すなわち、実験を行う直前まで、その内部が 20℃に保たれた恒温槽に、試験片を保管した。

2.2 実験装置

交差穿孔圧延の実験を行うための装置を製作した。

プラスティシンを用いて実験を行う場合、通常は石膏製の工具が用いられる。すなわち、プラスティシンを用いて穿孔圧延実験を行う場合、通常は石膏製のロール及びプラグが用いられる。しかしながら、石膏の比重は高く、予想される石膏製ロールの重量が非常に大きい。また、石膏は衝撃に弱いため、石膏製ロールを誤って落とした場合、石膏製ロールが破損する可能性が高い。

したがって、その比重が石膏の比重よりも小さく、その耐衝撃が石膏の耐衝撃よりも大きい、エンジニアリングプラスチックであるポリアセタール(POM)、商品名ジュラコンを用いて、ロール及びプラグを製作した。

ロール及びプラグの寸法を決定するために、特許庁のホームページにおいて公開されている、交差孔型圧延におけるロール及びプラグの寸法を参考にした。

図 1 に交差角及び傾斜角を示す。傾斜角が無い場合、ロール軸とプラグ軸はある平面に含まれる。ここで、図(a)の紙面をその平面と一致させる。その平面内においてロール軸とプラグ軸のなす角が交差角である。

プラグ軸を含み、その平面と直交する新たな平面を考える。ここで、図(b)の紙面をその新たな平面と一致させる。傾斜角が無い場合、その新たな平面に投影されたロール軸はプラグ軸と一致する。その新たな平面内において、投影されたロール軸とプラグ軸のなす角が傾斜角である。ここで、古い平面に投影されたロール軸とプラグ軸のなす角である交差角が変化しないように、傾斜角を変化させる。

なお、マンネスマン穿孔圧延においては、傾斜角はあるが、交差角は無いすなわち 0 度である。

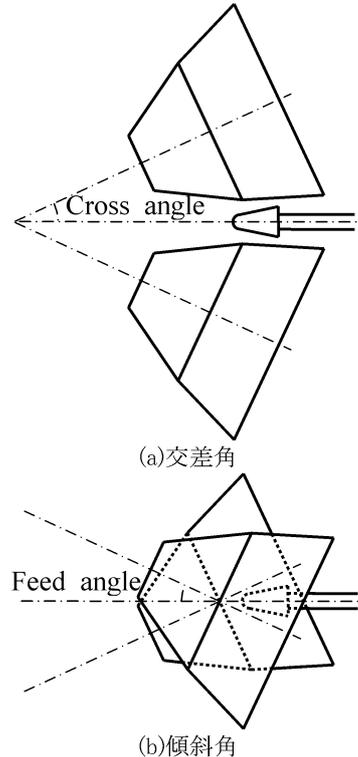


図 1 交差角及び傾斜角

図 2 にロール及びプラグを示す。ロール間隔の最も小さい場所であるゴージ部におけるロールの直径を 181mm、ロールの入口面角を 3 度、ロールの出口面角を 3 度にした。また、ロー

ルと試験片が接触しない場所ができるように、ロールの軸方向長さを決めた。なお、装置を単純にするために、ロール軸とロールを駆動するモータの軸を一致させた。ここで、モータの回転速度は10rpmである。一方、最大プラグ直径を25mm、プラグ長さを68mm、そして先端プラグ半径を5mmにした。

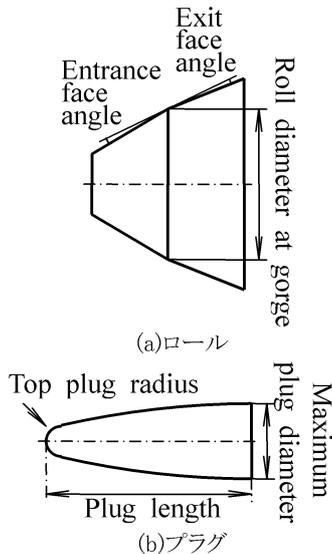


図2 ロール及びプラグ

表1に実験条件を示す。あるロール交差角の実験を行うために、1対のロールすなわち2本のロールが必要である。したがって、5種類のロール交差角において実験を行うために10本のロールを製作した。また、ロールを取り付けた構造物を、様々な方向に向けて圧延機の底板に取り付けることにより、ロール交差角を変化させた。一方、ロールを取り付けた構造物を、様々な方向に向けて圧延機の側板に取り付けることにより、ロール傾斜角を変化させた。なお、プラグが自由に回転できるように、プラグを取り付けた軸を、圧延機の支柱に取り付けた。ここで、ロール交差角25度、ロール傾斜角25度の実験条件を標準実験条件にする。図3に製作した実験装置を示す。

表1 実験条件

ロール交差角	5度, 15度, 25度, 35度, 45度
ロール傾斜角	15度, 25度, 35度
ロール間隔	25mm
プラグ先進量	10mm

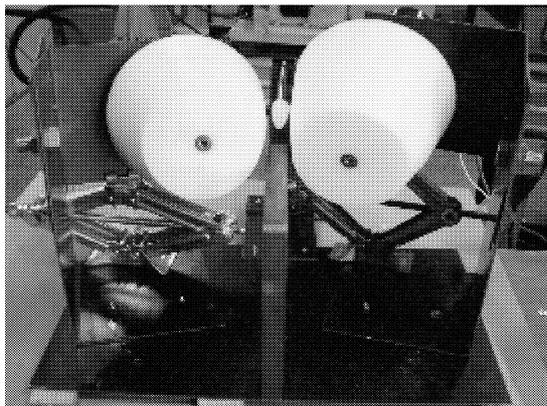


図3 実験装置

2.3 実験設備

購入したプラステイシンから、内部に空孔のないプラステイシンの試験片を得るために、真空土練機を利用した。ここで、真空土練機にかかる負荷を低減するために、真空土練機を電気ヒータで加熱した。また、試験片を簡単に作成するために、真空土練機の出口に、その内径が試験片の外径に等しいダイスを取り付けた。

3. 研究成果

試験片に円柱座標系を適用する。すなわち、試験片の半径方向に r を、円周方向に θ を、軸方向に z をとる。また、変位を u で表す。ここで、ゴージ部の z 座標を零にする。そして、ゴージ部より下流の領域の z 座標を正にする。そして、交差角及び傾斜角が、せん断ひずみ $\gamma_{\theta z}, \gamma_{rz}, \gamma_{r\theta}$ 及び垂直ひずみ ε_z に及ぼす影響を実験的に明らかにした。ここで、プラステイシンを用いたマンネスマン穿孔圧延に関する研究²⁾を参考にした。

3.1 せん断ひずみ $\gamma_{\theta z}$

せん断ひずみ $\gamma_{\theta z}$ は次式で与えられる。

$$\gamma_{\theta z} = \frac{\partial u_{\theta}}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} = \frac{\partial u_{\theta}}{\partial z}$$

ここで、変形の軸対称性を仮定した。すなわち、せん断ひずみ $\gamma_{\theta z}$ は、円周方向変位の軸方向勾配 $\partial u_{\theta} / \partial z$ で与えられる。図4にせん断ひずみ $\gamma_{\theta z}$ を示す。ここで、図中の太線は、実験前の材料の表面の軸方向線分を表す。

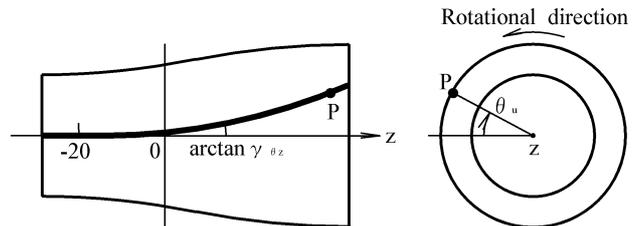


図4 せん断ひずみ $\gamma_{\theta z}$

その表面を軸方向にマジックインクで着色した試験片を用いて、実験を行った。まず、試験片を穿孔圧延している時に実験を中止することにより、穿孔圧延中の材料の変形を求めた。すなわち、軸方向の各位置における、円周方向の変位角 θ_u を求めた。ここで、 $z = -20\text{mm}$ における円周方向変位角 θ_u を零にする。さらに、試験片が回転する向きと逆向きの変位角を正にする。

図5にロール傾斜角25度における、円周方向変位角 θ_u を示す。図より、ロール交差角が5度及び15度の場合、 z 座標の増加と共に、円周方向変位角 θ_u は一旦減少して負になるが、その後増加して正になり、増加率は一定になる。すなわち、ひずみが一定になる。この傾向は、マンネスマン穿孔圧延における傾向と一致する²⁾。一方、ロール交差角が25度、35度及び45度の場合、 z 座標の増加と共に、円周方向変位角 θ_u は常に減少して、減少率は一定になる。すなわち、ひずみが一定になる。

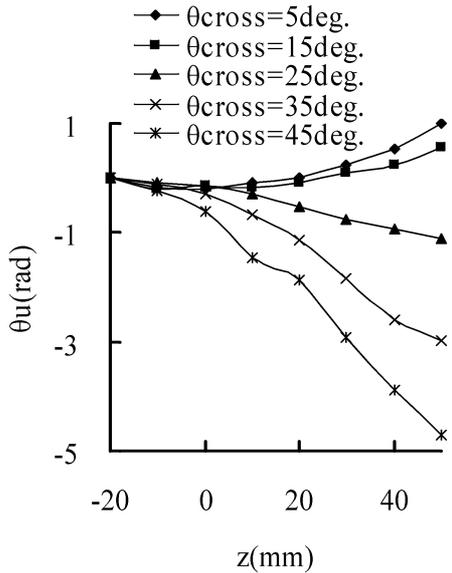


図5 円周方向変位角 θ_u (ロール傾斜角 25 度)

図6にロール交差角25度における、円周方向変位角 θ_u を示す。z座標の増加と共に、円周方向変位角 θ_u は常に減少して、減少率は一定になる。すなわち、ひずみが一定になる。

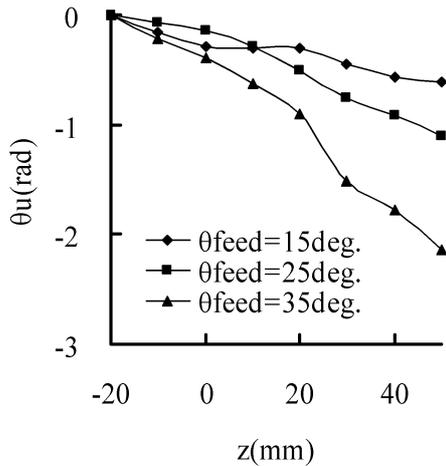


図6 円周方向変位角 θ_u (ロール交差角 25 度)

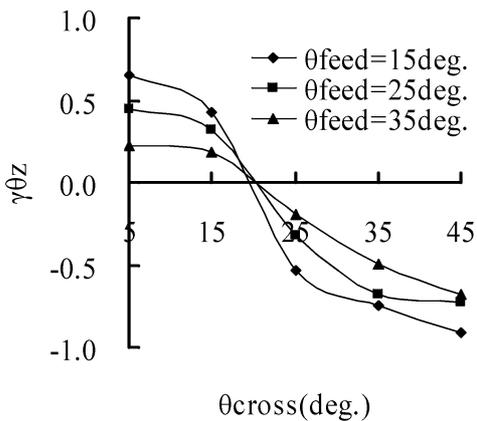


図7 全実験条件におけるせん断ひずみ $\gamma_{\theta z}$

次に、試験片を穿孔圧延している時に実験を中止せずに、穿孔圧延後の材料の変形を求めた。すなわち、円周方向変位の軸方向勾配 $\partial u_{\theta} / \partial z$ を求めることにより、せん断ひずみ $\gamma_{\theta z}$ を求めた。図7に全実験条件におけるせん断ひずみ $\gamma_{\theta z}$ を示す。図より、交差角の増加と共に、せん断ひずみ $\gamma_{\theta z}$ は正から負になる。また、傾斜角の増加と共に、せん断ひずみ $\gamma_{\theta z}$ の大きさは小さくなる。さらに、傾斜角に無関係に、交差角が20度付近において、せん断ひずみ $\gamma_{\theta z}$ が殆ど零になる。

3.2 せん断ひずみ γ_{zr}

せん断ひずみ γ_{zr} は次式で与えられる。

$$\gamma_{zr} = \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r}$$

すなわち、せん断ひずみ γ_{zr} は、半径方向変位の軸方向勾配 $\partial u_r / \partial z$ と軸方向変位の半径方向勾配 $\partial u_z / \partial r$ の和で与えられる。図8にせん断ひずみ γ_{zr} を示す。ここで、図中の太線は、実験前の材料の横断面を表す。すなわち、材料の厚さ方向における平均的なせん断ひずみを求める。なお、穿孔前にz軸上にある材料が、穿孔後に孔内面にあると考える。

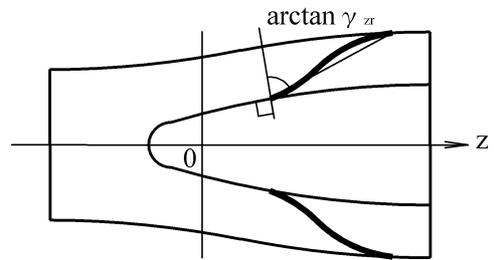


図8 せん断ひずみ γ_{zr}

その横断面をマジックインクで着色した試験片を用いて、実験を行った。まず、標準実験条件において、試験片を穿孔圧延している時に実験を中止することにより、穿孔圧延中の材料の変形を求めた。すなわち、軸方向の各位置における、せん断ひずみ γ_{zr} を求めた。図9に標準実験条件における、せん断ひずみ γ_{zr} を示す。z座標の増加と共に、せん断ひずみ γ_{zr} は増加するが、増加率は減少して零になる。

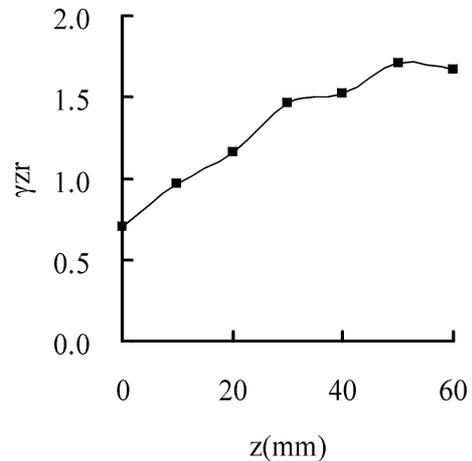


図9 せん断ひずみ γ_{zr} (標準実験条件)

次に、試験片を穿孔圧延している時に実験を中止せずに、穿孔圧延後の材料の変形を求めた。図10に全実験条件におけるせん断ひずみ γ_z を示す。図より、傾斜角の増加と共にせん断ひずみ γ_z は減少する。一方、せん断ひずみ γ_z は交差角に殆ど依存しない。

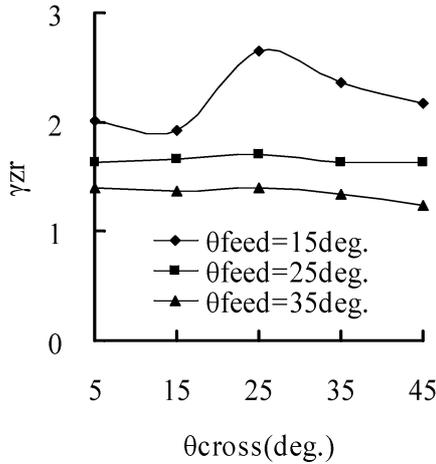


図10 全実験条件におけるせん断ひずみ γ_z

3.3 せん断ひずみ $\gamma_{r\theta}$

せん断ひずみ $\gamma_{r\theta}$ は次式で与えられる。

$$\gamma_{r\theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} = \frac{\partial u_\theta}{\partial r}$$

ここで、変形の軸対称性を仮定した。すなわち、せん断ひずみ $\gamma_{r\theta}$ は、円周方向変位の半径方向勾配 $\partial u_\theta / \partial r$ で与えられる。図11にせん断ひずみ $\gamma_{r\theta}$ を示す。ここで、図中の太線は、実験前の材料の縦断面を表す。すなわち、材料の厚さ方向における平均的なせん断ひずみを求める。なお、穿孔前に z 軸上にある材料が、穿孔後に孔内面にあると考える。

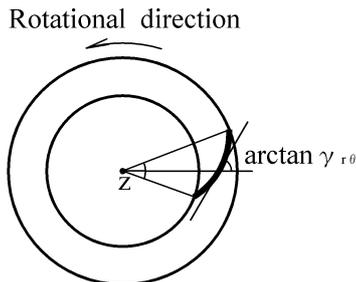


図11 せん断ひずみ $\gamma_{r\theta}$

その縦断面をマジックインクで着色した試験片を用いて、実験を行った。まず、標準実験条件において、試験片を穿孔圧延している時に実験を中止することにより、穿孔圧延中の材料の変形を求めた。すなわち、軸方向の各位置における、円周方向変位の半径方向勾配 $\partial u_\theta / \partial r$ を求めることにより、せん断ひずみ $\gamma_{r\theta}$ を求めた。図12に標準実験条件における、せん断ひずみ $\gamma_{r\theta}$ を示す。 z 座標の増加と共に、せん断ひずみ $\gamma_{r\theta}$ は増加するが、増加率は減少して零になる。

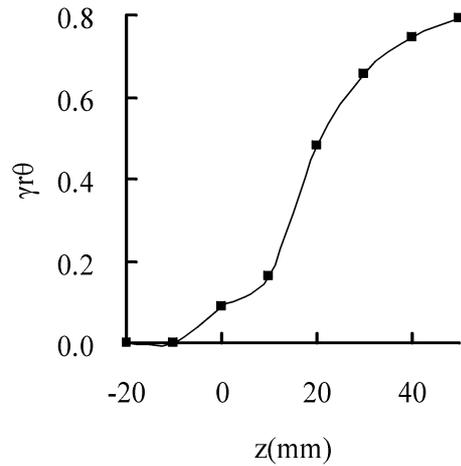


図12 せん断ひずみ $\gamma_{r\theta}$ (標準実験条件)

次に、試験片を穿孔圧延している時に実験を中止せずに、穿孔圧延後の材料の変形を求めた。すなわち、円周方向変位の半径方向勾配 $\partial u_\theta / \partial r$ を求めることにより、せん断ひずみ $\gamma_{r\theta}$ を求めた。図13に全実験条件におけるせん断ひずみ $\gamma_{r\theta}$ を示す。図より、交差角の増加と共に、せん断ひずみ $\gamma_{r\theta}$ は正から負になる。また、傾斜角の増加と共に、せん断ひずみ $\gamma_{r\theta}$ の大きさは小さくなる。さらに、傾斜角に無関係に、交差角が20度付近において、せん断ひずみ $\gamma_{r\theta}$ が殆ど零になる。

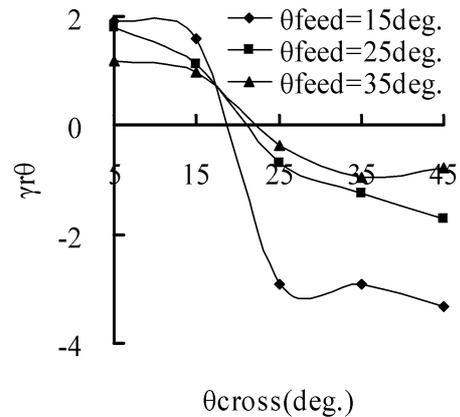


図13 全実験条件におけるせん断ひずみ $\gamma_{r\theta}$

3.4 垂直ひずみ ϵ_z

垂直ひずみ ϵ_z は次式で与えられる。

$$\epsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z}$$

すなわち、伸びひずみ ϵ_z は、軸方向変位の軸方向勾配 $\partial u_z / \partial z$ で与えられる。

その横断面をマジックインクで着色した試験片を用いて、実験を行った。ここで、試験片を穿孔圧延している時に実験を中止せずに、穿孔圧延後の材料の変形を求めた。すなわち、軸方向変位の軸方向勾配 $\partial u_z / \partial z$ を求めることにより、伸びひずみ ϵ_z を求めた。図14に全実験条件における伸びひずみ ϵ_z を示す。図より、傾斜角の増加と共に伸びひずみ ϵ_z は減少する。一方、伸びひずみ ϵ_z は交差角が45度付近において最小になる。

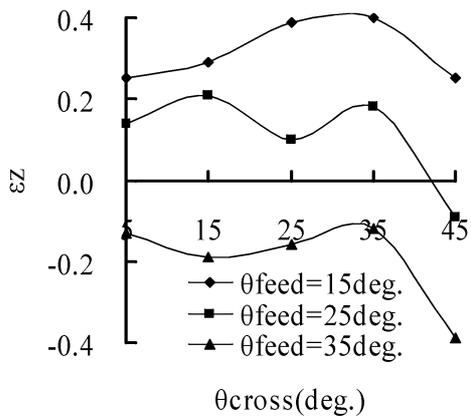


図 14 全実験条件における伸びひずみ ϵ_z

4. 結び

交差穿孔圧延の実験を行うための装置を製作した。ここで、交差角の影響を求めするために、お互いに交差角の異なる5組のロールを製作した。そして、プラスティシンを用いて交差穿孔圧延の実験を行った。ここで、材料内部のひずみを求めるために、マジックインクで着色した様々な種類の試験片を用いた。そして、交差角及び傾斜角が、せん断ひずみ $\gamma_{\theta z}, \gamma_{rz}, \gamma_{r\theta}$ 及び垂直ひずみ ϵ_z に及ぼす影響を実験的に明らかにした。

なお、実験結果と比較できる解析結果を得るために、FEMプログラムを開発中である。

謝辞

本研究を進めるにあたり研究助成頂いた(財)天田金属加工機械技術振興財団に深く感謝の意を表します。また、修士論文として本研究に取り組んだ水野公太君、卒業研究として本研究に取り組んだ、谷岡俊君、田村誠君、野村哲也君に感謝します。

参考文献

- 1) A. P. Green, "The use of plasticine models to simulate the plastic flow of metals", Philosophical Magazines, Philosophical magazine., Ser. 7, Vol. 42, No. 327, 1951, pp. 365-373.
- 2) 加藤健三・平沢猛志, "模型せん孔機による管材変形の研究", 塑性と加工, Vol. 5, No. 42, 1964, pp. 485-491.