論文

凹型ロールを用いた伸線加工におけるクラッシュと 張力が減径率に及ぼす影響

久保木 孝* 仙崎 泰慎**

村田 眞* 中村 友彦***

Effect of Tension and Crash on Reduction in Wire Diameter during Wire Drawing with Two Concave Rolls

Takashi KUBOKI *, Yasunori SENZAKI **,

Makoto MURATA * and Tomohiko NAKAMURA ***

(Received on October 27, 2008)

In recent years, forming processes of ultrafine and precise products have been playing a key role in the enhancement of the performance and functions of machines and equipment. In particular, ultrathin wire is expected to be used as a material with versatile functions. Wire drawing using hole dies has conventionally been used in the manufacture of thin and ultrathin wires. In thin conventional drawing, dozens of dies with specified hole diameter corresponding to each target diameter of wires are needed. Moreover, in the recent trend of miniaturizing dimensions, the die itself would be difficult to manufacture. In this research, a new wire-drawing method without a die is proposed. The proposed method has a similar machine composition to two roll straighter, i.e. wire is deformed between two skewed rolls. A series of finite element analysis was carried out to examine the suitable roll profile and the effect of crash and tension on the reduction in wire diameter. On the basis of the analysis, a prototype machine was designed and used to verify the efficiency of the new method. Results showed that an 11% reduction in diameter was achieved under optimum condition.

Key words: wire drawing, roll profile, reduction in diameter, concave roll.

1. 緒 言

近年、超微細かつ高精度な部材加工品の製造は、様々な機器の高性能化を先導している。特に極細線と呼ばれる超微細な線材は、多種多様な用途を持つ素材として期待されている¹⁾。細線、極細線の製造法である伸線加工では、穴型ダイスを用いる引抜き加工が中心である^{2), 3)}。そのため、個々の仕上げ径に応じた穴径を有するダイスが必要になる。製品の軽量化・小型化にともない極細線径材が必要になる、或いは、複数種類の素材を反応させて新材料を開発する際、体積に対して表面積の大きい微細材料が必要となる可能性もある⁴⁾。従来の伸線加工では、10 μ m 以下の穴径を有す

るダイスそのものの製造が困難となる可能性がある。そこで、本研究ではダイスを用いない新しい伸線加工法を提案する。具体的には、管の矯正加工と同様に、二個一対の凹型ロールを用いる加工法である^{5), 6)}。ロール間隙、或いは、圧下力を変更することによって伸線径を制御することが可能である。本報では観察の容易な 1.0mm の線材径を用い、凹型ロールの形状、クラッシュ、張力の影響を有限要素法によって考察した上で、実際に加工機を設計、製作し、新加工法の加工特性を検討した。

2. 凹型ロール形状の検討

2.1 凹ロール伸線加工と加工条件

Fig.1 に本研究にて提案する二個一対の凹ロールを用いる伸線加工の概念図を示す。線材の進行方向に傾き角 ϕ_d 、 ϕ_b を有する、二個の凹型ロール間に線材を挟み、ロール間隙 G を線材の初期径以下とした状態で、ロールを回転させる。これによって、線材を回転させて全周に逐次負荷を与えるとともに、軸方向に送りを与える。従来矯正加工では、

* 電気通信大学電気通信学部知能機械工学科
〒182-8585 調布市調布ヶ丘 1-5-1
Department of Mechanical Engineering and Intelligent Systems, The University of Electro-Communications, 1-5-1, Chofugaoka, Chofu-City, 182-8585, Japan.

** 電気通信大学大学院電気通信学研究科知能機械工学専攻 同上
Graduate student, The University of Electro-Communications, ibid.

*** 東洋製鋼株式会社 〒100-8522 東京都千代田区内幸町 1-3-1
Graduated student, Toyo Seikan Kaisha, LTD.
1-3-1, Uchisaiwai-Cho, Chiyoda-Ku, Tokyo, 100-8522, Japan.

パスライン上に2ロール間隙の中心が存在している状態を基準とし、Fig. 1において間隙中心にy方向変位、いわゆる、オフセットを与え、位置を元のまま上下のロール角度 ϕ_d , ϕ_u は異なる値とするのが通常である。本報では矯正効果は研究の対象外としているため、オフセットは0とし、上下のロール角度は同一とする。また、ロール角度は一般的に使用されている2ロール矯正機を参考にしてロール角度を 30° とした⁷⁾。解析条件をTable 1に示す。素材として焼きなました、アルミニウム A1100を用いた。

Fig. 1 Schematic illustration of 2-roll drawing

Table 1 Working condition

Roll	Minimum diameter D_R / mm	10
	Caliber radius r_c / mm	13, 25, 50, 75, 104
	Rotation in FEM ω_R / rad·s ⁻¹	3.26
	Rotation in exp. N_R / rpm	50
Wire	Material	Aluminium A1100 (annealed at 345°C)
	Diameter D_0 / mm	1.0
Operational condition	Skew angle ϕ_u, ϕ_d / deg.	30
	Crash in FEM δ_c / mm	0-0.4
	Load in exp. F / N	0-33
	Tension T_F, T_B / MPa	0-36
	Feed in FEM	Idol
	Feed in exp. f / mm·s ⁻¹	13.1

2.2 凹型ロールの幾何学的検討

幾何学的検討により、径1.0mmの線材と凹型ロールが線接触するロールプロファイルを計算し、単一円弧で近似することにより、半径 $r_c=16.6\text{mm}$ を得た。クラッシュ $\delta_c=D_0-G=0.05\text{mm}$ を与えた際の、幾何学的な接触状態をFig. 2(a)に示す。凹型ロールを用いることにより、加工中常にロールと線材が接触することがわかる。ロールにより線材が拘束され、圧下をかけることにより、減径効果が得られ、加工が可能であると考えられる。しかし、接触領域が大きい場合、ロール端部で加工が行われてしまい、加工が不安定になる可能性がある。そのため、ロール端部では線材とロールは接触せず、加工部中央で接触領域が最大となるロールプロファイル半径を計算から導出し、 $r_c=25\text{mm}$ とした。その際の幾何学的な接触状態をFig. 2(b)に示す。

3. 解析結果

3.1 凹型ロール形状が線材に及ぼす影響

凹ロールを用いた加工が可能であるか検討するため、英国ウェールズ大スウォンジー校で開発された有限要素法汎用コードELFENを用いて解析を行った。二つの凹型ロールを剛体、線材を弾塑性体とした。幾何学的に算出したロール形状を基準に、ロールプロファイル半径 r_c を13, 25, 50, 75, 104mmに設定し、その影響について検討する。 r_c が小さくなるにともない、線材の逃げが少なくなると考えられる。これは、 r_c が小さいとロール間隙が小さくなるた

Fig. 2 Contact area of wire and roll

Fig. 3 Relationship of roll radius and wire ($r_c=13\text{mm}$)

(a) Crash $\delta_c/D_0=0.1$ (b) Crash $\delta_c/D_0=0.2$ (c) Tension $T=27\text{MPa}$

Fig. 4 Effect of crash on cross section of drawn wire

(a) Tension $T_F, T_B=0\text{MPa}$ (b) Tension $T_F, T_B=27\text{MPa}$

Fig. 5 Wire position when $\delta_c/D_0=0.1$

め、線材との接触領域が長手方向に拡大し、且つ、周方向にも拘束領域が拡大するため、安定した加工が可能となるためである。 r_c が13mmのとき最も線材の逃げが少なく、線材に対して拘束力が強くなる。しかし、Fig. 3に示すように r_c が小さくなりすぎると、線材にロールがめり込んでしまい、ロール中央部よりも端部での加工が強くなるため、反対に安定した加工ができない。また、 r_c を大きくしすぎると、ロールと線材との隙間が広がり、拘束力が低下する要因につながる。ロールと線材との接触領域がロール全体に広がるロール形状ではなく、ロール中央部でロールと線材が接触するロール形状であれば、ロール端部での加工が行われないため、安定した加工が可能である。そのため、以下の検討では、ロール中央で加工がおこなえ、線材の直径1.0mmにおける凹型ロールでの加工が可能で、線材をロール間隙加工部へ拘束する力が最も強いと考えられる、ロールプロファイル半径 $r_c=25\text{mm}$ を採用した。

3.2 張力が線材に及ぼす影響

有限要素法を用いて線材初期径 D_0 からロール間隙 G を減じた量であるクラッシュ $\delta_c = D_0 - G$ が加工後の線材断面形状に及ぼす影響を調査した。実験では、条件により前方張力と後方張力で一致しない場合があるが、解析では前方と後方で張力は等しいとする。解析後の線材の断面図を Fig.4(a) (b) に、Fig.1 の a 方向から見た加工中の線材の挙動を示した図を Fig.5(a) (b) に示す。同図のように、クラッシュ量の大きさによらず減径効果は得られない。これは、Fig.5(a) に示すように、線材は上下のロール表面間距離が最小となる位置(以下「ロール直下位置」と呼ぶ)になく、水平方向に逃げた位置に存在する。水平方向に逃げた位置では斜め上方、或いは、斜め下方から観察するとロール間隙は G よりも大きくなるため、狙い通りの寸法形状に加工できない。そこで、線材の両端部に張力を付与させロール直下に拘束することを試みた。張力を付与したときの線材の断面図を Fig.4(c) に、ロール直下での線材の位置を Fig.5(b) に示す。張力を付与することにより、減径効果が得られることがわかる。Fig.6 にクラッシュ量とロール直下からの水平方向の逃げの関係を示す。Fig.6 に示すように、張力がない時と張力を付与した時とでは、水平方向の逃げが大きく異なる。このことから、張力を付与することにより、線材を水平方向に拘束でき、ロール直下近傍で加工が可能になり、張力を付与していないときと比べて、減径効果が得られることがわかる。

解析結果より、減径率とクラッシュ量との関係を各張力でまとめたものを Fig.7 に示す。減径率 R_d は(1)のように定義した。

$$R_d = \frac{D_0 - D_{ave}}{D_0} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 D_0 は初期径、 D_{ave} は解析後の断面径の平均値である。

また、張力は A1100-0 材の引張強さが 90MPa であり、引張強さの 20,30,40% の値を採用した。Fig.7 より張力が強くなるにともない、減径率が上昇していることがわかる。これは、張力の上昇にともない、線材に対して水平方向の拘束力が上昇し、ロール最小間隙近傍で加工が行われたためである。また、圧下率 10%~20% では、ロールによるクラッシュと張力による延伸効果により、減径率は上昇していき、圧下率 20% で最大の減径効果が得られるが、圧下率 30%~40% で減径率は減少していく傾向がみられた。これは、Fig.6 に示すように、水平方向の逃げがクラッシュ量の増加にともない大きくなるためだと考えられる。Fig.8 にクラッシュ量とロール荷重の関係を示す。クラッシュ量 10% でロール荷重は最大値を示し、10%~20% で大きく減少する。20% 以降は、緩やかな減少となる。これは、クラッシュによる逃げの上昇に伴い、ロールと線材との接触面積が減少したためだと考えられる。張力 $T=36\text{MPa}$ 場合、荷重が最大となるのは 10% であるにも拘わらず、減径率が最大となるクラッシュ量は 20% であるため、クラッシュ増加による減径促進効果と、逃げによる減径低下によって、線材に与える荷重には最適値が存在すると考えられる。

Fig. 6 Relationship of displacement and crash in 2-roll drawing (FEM)

Fig. 7 Effect of tension and crash on reduction in diameter in 2-roll drawing (FEM)

Fig. 8 Relationship of load and crash in 2-roll drawing (FEM)

3.3 張力とロール荷重の加工分担

線材の減径は張力による延伸効果とロールによるクラッシュの相乗効果によって生じていると考えられる。張力とロールにより生じる、ロール直下においてロールと線材が接触する部分に発生する y 軸方向の応力を相当応力で無次元化した結果を Fig.9 に示す。この相当応力は VonMises の相当応力である。Fig.9(a) に示すクラッシュ量 20% のとき、減径率は最も高くなった。このとき、張力が上昇するにともない、ロール荷重寄与分 σ_y/σ_{eq} も上昇する。張力が上昇することにより、線材がロール間隙最小となる位置に拘束されるため、ロール荷重の伝達が正確にされているためだと考えられる。このことから、クラッシュ量 20% のとき、張力よりもロール荷重の方が、減径効果に影響を及ぼして

Fig. 9 Relationship tension and crash in 2-roll drawing

いると考えられる. Fig. 9(b)クラッシュ量 40%のとき, 減径率は低い. このとき, 張力寄与分 T/σ_{eq} が上昇しても, ロール荷重寄与分 σ_y/σ_{eq} は変化せず, 張力寄与分 T/σ_{eq} と同様の値を示している. クラッシュ量 40%のとき, 張力とロール荷重は減径効果に対して同様の影響を及ぼしている. また, 減径率が最大となるクラッシュ量は 20%のときであり, クラッシュ量が 20%より大きくなると減径率は減少する. これにともない線材がロールから受ける鉛直方向応力は減少する. 以上のことから, 減径加工に寄与しているのは, ロール荷重であり, 張力の延伸効果は少ない. 張力は延伸効果よりも線材をロール直下位置に拘束することによって, ロール荷重による減径を補助していると考えられる.

4. 実験結果と考察

4.1 実験機の外観と構成

解析結果を基に, 凹型ロール伸線加工試作機を製作した. 外観を Fig. 10 に示す. 試作機では, 加工部の前方に巻き取り装置を配置し, 巻き取り速度 f を制御可能としている. 張力は, 後方から錘で引張り, 前方から巻き取ることによって付与しており, 加工方向後方, 前方の張力をロードセルにより計測している. 線材に生じるねじれは, ベアリングにより吸収している. 解析では, ロールを垂直方向に位置制御し, ロール間隙 G を加工条件とした. 一方, 実験では, ロールの垂直方向位置を精度良く制御するのが困難であるため, ロードセルを用いてロール荷重 F を測定し, F を加

Fig. 10 Prototype machine for 2-roll drawing

工条件とした.

4.2 実験結果

線材の直径の測定は, マイクロメータを用いた. 測定箇所は, 加工部分を長手方向 10mm ごとに測定し, 値が安定している部分から, 5 箇所について周方向に 90° ピッチにて測定した. 長手方向に計 10 箇所における測定値の平均値をとり, 加工後の直径とした. 線材は残留応力の影響を除去し, 加工力の低下及び加工性の向上を図るために焼きなましを施し, 実験を行った. Fig. 11 にロール荷重 F が減率 R_d に及ぼす影響を示す. 横軸にロール荷重 F を, 縦軸に減径率をとる. 送り速度は $f=13.1\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 張力は $T=18, 27, 36\text{MPa}$ とした. 張力の増加にともない, 減径率が上昇していることがわかる. $T=18, 27\text{MPa}$ では, ある程度ロール荷重を上げると減径率は一定になり, 上昇しない. 一方で, 張力 $T=36\text{MPa}$ では, ロール荷重 $F=16\text{N}$ で最大の減径率 11% が得られた. ロール荷重 F が一定の時, 張力の上昇にともない, 減径率が上昇している. これは, 張力が上昇するにともない, 線材の水平方向の逃げが抑制される. そのため, ロール間隙が最小となる場所近傍で加工が行われるためである. また, $T_B=36\text{MPa}$ と $T=18, 27\text{MPa}$ とで最大の減径率が大きく異なる. これは, $T=36\text{MPa}$ が, 線材の初期降伏応力近傍であるため, 延伸効果による減径が $T=18, 27\text{MPa}$ よりも大きい. そのため, 減径率が大きく異なると考えられる. $T_B=36\text{MPa}$ のとき, ロール荷重 $F=16\text{N}$ 以上になると, 減径率は減少していく. これは, 解析と同様に圧下量を上

Fig. 11 Effect of tension and load on reduction in diameter in 2-roll drawing (Experiment)

げると、線材が水平方向に逃げってしまうため、適正な位置で加工が行われないことが原因と考えられる。また、張力が低い場合、線材の水平方向の拘束力が弱いため、ロールの圧下は困難になる。解析結果とは定性的に一致している。

送り速度が減径率に及ぼす影響を考察する。Fig.12(a), (b)にロール荷重 $F=10, 20\text{N}$ での送り速度と減径率の関係をグラフに示す。破線はロールの送り速度である。ロールの送り速度は式(2)のように定義する。Fig. 12(a), (b)より凹型ロールの送り速度と巻き取り装置の送り速度が近い値になるにつれて減径率が大きくなっていることがわかる。送り速度が遅いとき減径率が減少するのは、ロールによる線材の送りに比べて巻き取り速度が遅いためロール前方に線材のたわみが生じてしまい張力が安定して付与されないためである。また、送り速度が速いときは、らせん状に発生する加工部位のピッチが大きくなり、全周の加工ができない。以上のことから、ロール外周面の長手方向速度と巻き取り装置の送り速度は近い値であることが望ましいと考えられる。

$$f = \frac{D_R}{2} N_R \tan\left(\frac{\phi_d + \phi_u}{2}\right) \quad (2)$$

D_R : ロール最小径 N_R : ロールの回転数

ϕ_d, ϕ_u : ロール角度

Fig. 12 Effect of feed speed on reduction diameter in 2-roll drawing

Fig.13(a)に加工前の線材の輪郭形状の測定結果を、Fig. 13(b)に加工後の線材の輪郭形状の測定結果を示す。測定値は、デジタルマイクロメータを用いて軸方向の位置は変えずに周方向に 12° ピッチで回転させ 360° まで、計 30 箇所の直径を測定し、測定結果とした。最小径と最大径の差は 0.002mm であった。直径比にすると 0.2% である。これより、ある程度の真円度は得られていると評価できる。また、Fig. 13 より加工前より加工後の線材のほうが真円度が高いのがわかる。これは、二個一対の凹型ロールを用いる加工法であるため、線材が矯正されたのだと考えられる。

Fig. 13 Photograph of cross section drawing wire (Tension $T_B=36\text{MPa}$, Roll load $F=16\text{N}$)

5. 結 言

二個一対の凹型ロールを用いる伸線加工法を提案し、線材径 1.0mm のアルミニウム A1100 を対象に、解析及び実験により新加工法の加工特性について検討した。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 本加工法を用いることにより、穴ダイスを用いることなく減径することが可能である。
- (2) 張力の無い状態でロール圧下を与えても、十分な伸線加工はできない。
- (3) ロール圧下に加えて、張力を付与することにより、減径効果が得られ加工が可能になる。
- (4) 試作機において、張力 $T_B=36\text{MPa}$ 、ロール荷重 $F=16\text{N}$ の時、最大減径率 11% を達成した。
- (5) ロールと巻き取り装置の送り速度はほぼ一致していることが望ましい。
- (6) 最小径と最大径の差は 0.002mm であった。

謝 辞

本研究は天田金属加工機械技術振興財団の研究開発助成 AF-2006003 によって行われた。ご厚意に深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) 古島剛・真鍋健一・酒井孝: 塑性と加工, **47**-548 (2006), 66-70.
- 2) 山下勉・吉田一也: 同上, **46**-529 (2005), 161-165.
- 3) 梶野智史・浅川基男: 同上, **47**-549 (2006), 47-51.
- 4) 近藤雅之・今井義一・手塚英志・香山晃: 鉄と鋼, **9**-75 (1989), 49-55.
- 5) 久保木孝・菅原弘匡・中村友彦・村田眞: 平 20 塑加春講論, (2008), 239-240.
- 6) 谷貝昌幸・工藤英明: 塑性と加工, **10**-104 (1969), 627-634.
- 7) 日本塑性加工学会: 塑性加工技術シリーズ 15, (1992), 130-135, コロナ社.