



T. Kuboki

凹型ロールを用いたダイレス伸線加工

久保木 孝*

1. 研究の目的と背景

近年、超微細かつ高精密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。その中で、機械の構成部材、あるいは加工用部材として、細線材の需要は高まっている。細線材の主な利用において鉄系材料ではピアノ線をはじめ、スチールコードワイヤ、ばね、ソーワイヤなどが挙げられる¹⁾。一方、非鉄系材料ではアルミ、銅、金などが用いられており、電気伝導線が優れている点でリード線などの電気用部材として使用されている²⁾。また、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³⁾。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^{4),5)}。引抜き加工は、高精度の線材が得られるが、急激な細線化の条件では、線材内部の欠陥、線材の破断など成形品品質の低下につながる⁶⁾。品質低下を防ぐためには、複数の径が異なるダイスを用いて、線材を徐々に縮径していく必要がある。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。また、製品の軽量化・小型化にともない、更なる極細線径材が必要となる可能性があるが、従来の伸線加工では $10\mu\text{m}$ 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など、問題点と改良点が従来の伸線加工にはある⁷⁾。

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⁸⁾⁻¹³⁾。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¹⁴⁾。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。本報では凹型ロールの形状、クラッシュ、張力の影響を有限要素法等によって考察した上で、実際に加工機を設計、製作し新加工法の減径効果について検証する。また、提案する加工では、一組の工具を用いてフリーサイズに線材を加工することが可能であり、その特性についても検証する。

2. 研究方法

図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を有する二個の凹型ロール間に被加工材を挟み、ロール間隙 G を線材の初期径以下とした上で、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荷重を与え

るとともに、軸方向に送りを与える。矯正加工では、パスラインに対して二ロール間隙の中心に変位、いわゆる、オフセットを与えるとともに、上下のロール角度 ϕ_u , ϕ_d は異なる値とするのが通常である。本報では矯正効果は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。

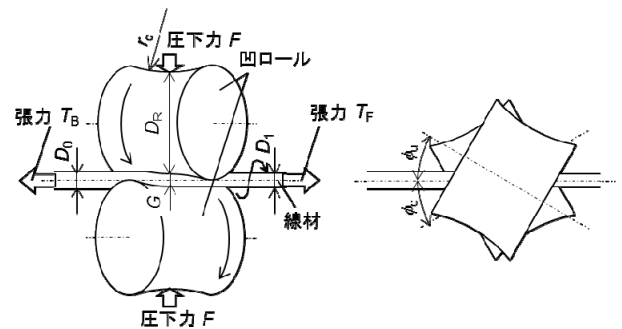


図1 凹型ロールを用いた伸線加工法概念図

表1に加工条件を示す。素材として焼き鈍し処理後のアルミニウム A1100 を用いた。直径 1.0mm の素材に対して、ロール中央部の最小直径 D_R を 10mm としている。

表1 加工条件

ロール	最小径 D_R /mm	10
	プロファイル半径 r_C /mm	25
	FEM での角速度 ω_C /rad·s ⁻¹	3.26
	実験での回転数 N_R /rpm	50
線材	材料	アルミニウム A1100 (345℃にて焼きなまし)
	直径 D_0 /mm	0.2 - 1.0
加工条件	ロール角 ϕ_u, ϕ_d /degree	30
	FEM でのクラッシュ δ_C /mm	0 - 0.4
	実験での圧下力 F /N	0 - 33
	前後方張力 T_F, T_B /MPa	0 - 36
	FEM での送り 実験での送り f /mm·s ⁻¹	従動 13.1

幾何学的な検討により、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図2(a)に示す。凹型ロールを用いることにより、加工

* 電気通信大学知能機械工学専攻 准教授

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図 2(b)に示す．

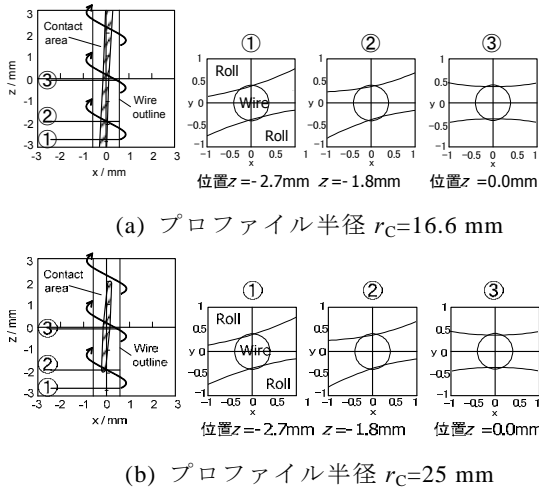


図 2 幾何学計算による接触領域と断面形状

凹ロールを用いた加工が可能であるか検討するため，英国ロックフィールド社製の汎用有限要素法コード ELFEN を用いて解析を行った．解析モデルの例を図 4 に示す．解析では，2 つの凹型ロールを剛体，被加工材を弾塑性体とし，動的陽解法を適用した．線材の両端に前方張力 T_F と後方張力 T_B を等しく付与し，線材には送り変位や送り力を加えていない．つまり，線材はロールとの摩擦によって，送りが与えられる．この有限要素解析モデルを用いて，プロフィール半径の検討の他，重要な加工条件であると考えられるクラッシュ $\delta_c = D_0 - G$ と張力 T が成形性に及ぼす影響を調査した．この結果，適正な条件下では，従来型の穴ダイスと同程度の断面減少率を得ることができたため，さらに，素材径を変更し，同一プロフィールを有するロールを用いた複数サイズの成形，所謂，フリーサイズ伸線加工の実現性を検討した．

解析結果を基に，凹型ロール伸線加工試作機を製作した．概念図を図 3 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．基本的な設定では，ロール最小径 D_R ，ロール回転数 N_R ，ロール角度 $\phi_0 = \phi_d$ から，すべりの無い条件を幾何学的に算出し， $f = 13.1\text{mms}^{-1}$ 一定としている．加工部後方には錘を吊し，後方張力 T_B を付与している．前方張力 T_F は加工開始後，増加し，後方張力 T_B 近傍の一定値に達する．

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の平均値 F を測定し， F を加

工条件とした．

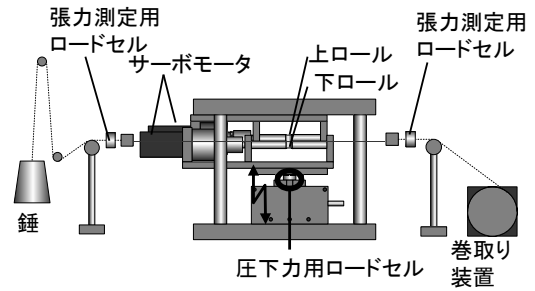


図 3 凹型ロールを用いた伸線機概念図

3. 研究成果

3.1 有限要素法による検討結果

クラッシュ δ_c を与えると，線材が上下のロール表面間距離が最小となる適正な加工位置(以下「ロール直下位置」と呼ぶ)になく，水平方向に「逃げた」位置に存在するようになることが観察された．直径 0.8mm と 0.2mm において線材の位置を観察した結果を図 4 に示す．18MPa 以上の張力付与によって，ロール直下位置近傍にて線材を加工できるが逃げは不可避免的に発生している．

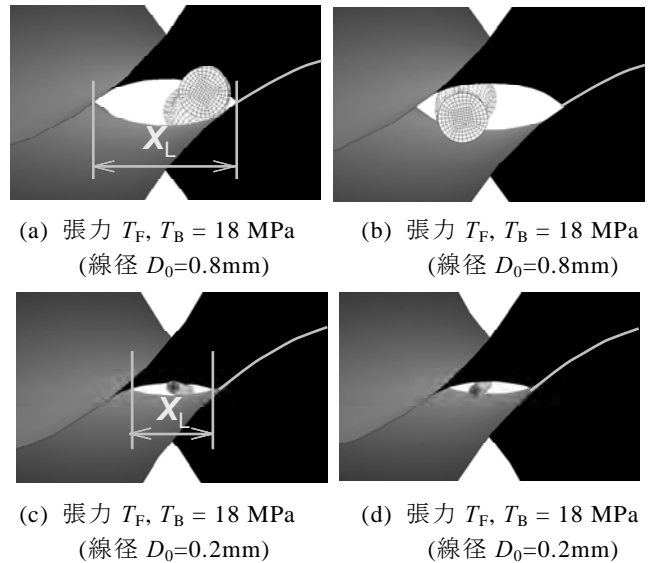


図 4 張力付与による「逃げ」抑制効果

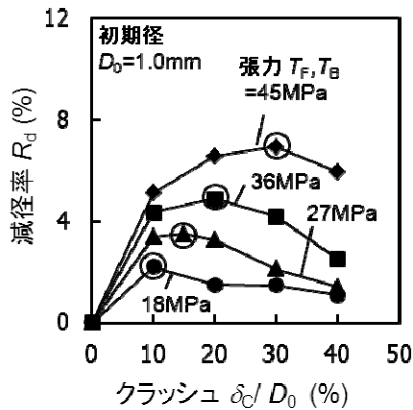
クラッシュと張力の組合せによる減径効果を有限要素法によって調べた結果を，線径 1.0 と 0.2mm の場合について，図 5 に示す．張力は，A1100-0 材の引張強さ 90MPa に対して，20, 30, 40, 50%とした．減径率 R_d を式(1)のように定義する．

$$R_d = (D_0 - D_1) / D_0 \quad (1)$$

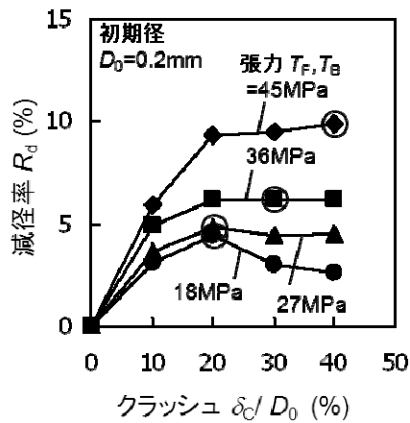
ここで， D_1 は加工後の線材径である．

張力が大きくなるにともない，減径率が上昇している．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

るとともに、張力による軸方向への延伸効果のためである。また、クラッシュ率 δ_c/D_0 が 10%~20% の範囲では、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、図中○にて示す最大の減径効果が得られるクラッシュ率 δ_{c-opt}/D_0 が存在するが、さらにクラッシュ率を大きくすると減径率は減少する。これは、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と考えられる。また、線材の径によらず、同様の傾向がみられた。



(a) 初期線材径 $D_0=1.0\text{mm}$



(b) 初期線材径 $D_0=0.2\text{mm}$

図 5 張力とクラッシュの組合せ減径効果(解析)

3.2 試作機を用いた検討結果

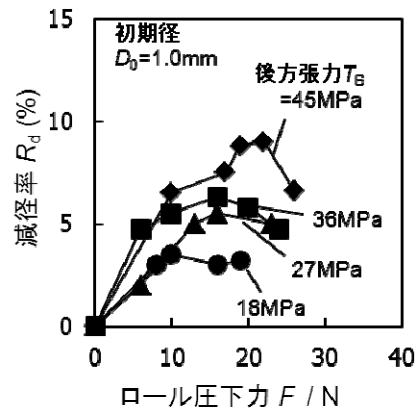
凹型ロールを用いることによって線材の直径を減径するフリーサイズ伸線加工が可能であることが解析により予測された。製作した凹型ロール伸線加工機を用いて、解析結果を検証した。

線材の直径の測定には、電気マイクロメータを用いた。測定箇所は長手方向 5mm 毎に 6 箇所とし、断面内では周方向に 30° ピッチにて測定した。これら長手方向 6 箇所における直径の平均値を加工後の直径とした。

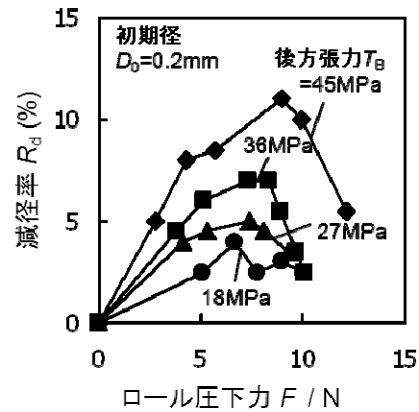
減径率とロール荷重との関係を、各張力でパラメータとしてまとめて、図 6 に示す。後方張力 T_B の増加にともない、減径率が上昇する。これらの結果は解析結果と定性的に一致しており、ロール荷重が一定のとき、張力の上昇にともない、線材の水平方向の逃げが抑制される。そのため、ロール間隙が最小となる位置近傍で加工が行

われるためと考えられる。後方張力 $T_B=18\sim 36\text{MPa}$ と $T_B=45\text{MPa}$ では、最大の減径率が大きく異なる。これは、 $T_B=45\text{MPa}$ が、線材の 0.2% 耐力 35MPa よりも大きい値であるため、延伸効果による減径が $T_B=18\sim 36\text{MPa}$ よりも大きくなるためと考えられる。また、張力が低い場合、線材の水平方向の拘束力が弱く、延伸効果も小さいため、減径率は小さい。

一方、ロール荷重 F が増加するのにもない減径率が增加するが、最大減径率が得られる荷重 F_{opt} を超えると減径率は減少する。過大なロール荷重において減径率が減少するのは、解析を用いて考察した通り、線材が水平方向に逃げてしまうため、適正な位置で加工が行われないためである。後方張力 T_B が 45MPa、荷重 F が 11N のとき、最大減径率 11% が得られた。



(a) 初期線材径 $D_0=1.0\text{mm}$



(b) 初期線材径 $D_0=0.2\text{mm}$

図 6 張力とクラッシュの組合せ減径効果(解析)

図 7 に線材の径と減径率の関係を示す。縦軸は、各張力での最大の減径率を示している。線材の径によらず、張力の上昇にともない、最大減径率は上昇する。これは、線材に対する拘束力、延伸効果が上昇するためと考えられる。また、解析結果と同様に、張力に関係なく、線材の径が小さくなるにともない、最大減径率は上昇していく傾向がみられた。これは、同一のプロファイル半径 r_c の条件では、細径化すると線材径 D_0 に対する接触域長さが L_c の比が増加し、線材が上下のロール表面と接触する回数が増加するためと考えられる。図 8 に線材径 D_0

が接触回数に及ぼす影響を幾何学的に評価した結果を示す。ここでは「逃げ」がないと仮定し、径 D_0 の円柱表面とロール形状の干渉から幾何学的に接触領域を計算し、接触域長さ L_c を線材の螺旋ピッチ P_s で除し 2 倍した値を平均接触回数として用いている。線材径 D_0 の減少とともに平均接触回数 $2L_c/P_s$ は増大することが確認できる。

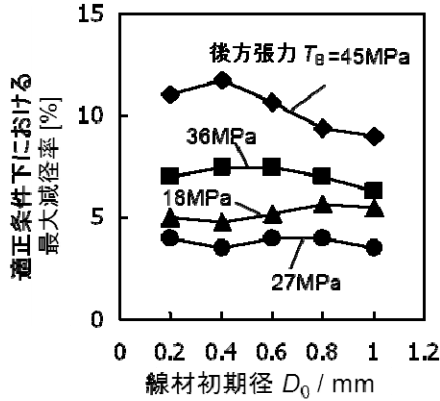


図 7 線材径に応じた最大減径率の変化

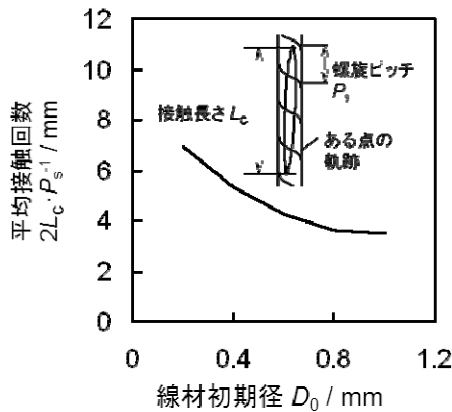
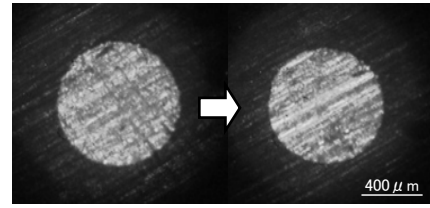


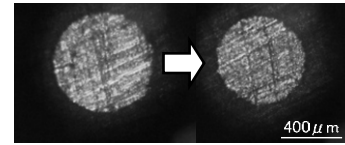
図 8 接触回数の幾何学的検討

図 9 に線材径 $D_0=1.0\sim 0.2\text{mm}$ での加工前後の断面図（最大減径率時の断面図）を示す。断面観察は、線材の断面を紙やすりで研磨後、光学顕微鏡を用いて観察した。螺旋回転しながら進む線材に対して、逐次的に加工しているにも関わらず、成形後の断面も比較的眞円に近い。

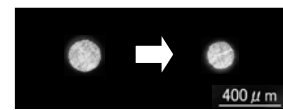
図 10 に加工後の加工部長手方向の直径のばらつきを示す。ここでは、素材線径 D_0 が 1.0mm, 0.6mm, 0.2mm の結果を示している。線材の径によらず、偏径差は 0.001mm~0.003mm, 直径比では 2% 未満と小さい。また、線材の径に依らず、加工部長手方向の直径のばらつきも小さい。本加工法を用いても、加工部長手方向でばらつきの少ない成形品が得られることが確認できた。ただし、線径の減少にともない、偏径差がやや増加する傾向にある。



(a) 初期径 $D_0=1.0\text{mm}$
(後方張力 $T_B=45\text{MPa}$, ロール荷重 $F=22\text{N}$)



(b) 初期径 $D_0=0.6\text{mm}$
(後方張力 $T_B=45\text{MPa}$, ロール荷重 $F=9\text{N}$)



(c) 初期径 $D_0=0.2\text{mm}$
(後方張力 $T_B=45\text{MPa}$, ロール荷重 $F=9\text{N}$)

図 9 成形前後の線材断面変化

4. 結言

本研究では、穴型ダイスを用いることなく、伸線加工可能な凹ロールを用いたフリーサイズ伸線加工法を提案した。まず、最初に幾何学的な検討を実施しロールプロファイルを決定し、数値解析を用いて、特に、張力やクラッシュの組合せによる減径効果について考察した。その結果、張力とクラッシュともに減径効果を最大にする適正値が存在することが予測された。張力は、線材をロール直下の適正な加工位置に拘束するとともに、延伸効果によって線材の減径を促進する。しかしながら、過大な張力は線材の破断を招く。一方、線材の減径にはクラッシュが必要であるが、クラッシュが過大になると、線材の「逃げ」を招く。その結果として、最適値が存在する。また、同一のロール形状、加工条件であっても、素材 1.0mm~0.2mm の加工は可能である。

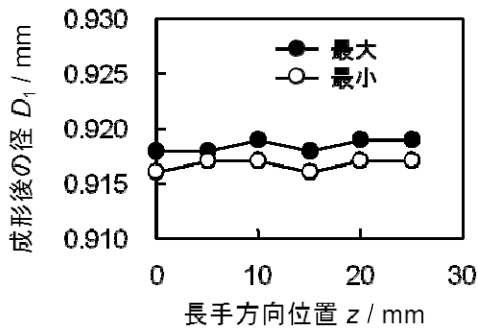
さらに、得られた数値解析結果を基に、試作機を作製し、提案した新しい伸線加工法の有効性を検証した。その結果、定性的には、解析結果と非常に良い一致を示した。さらに、定量的には解析以上の減径効果が得られ、最適条件下では、減径率=11%を達成した。この減径効果は、素材 1.0mm~0.2mm に対して、得られ、本加工法のフリーサイズ加工法としての有効性も確認された。また、本加工法は、ロール径 10mm に対して、その 10 分~100 分の 1 の径を有する線材の加工が可能である点でも有効であり、極細線加工実現に対して一定の目処を得た。

謝 辞

本研究では公益財団法人天田財団のご援助により、新たな加工法の特性を明らかにするとともに、更なる研究を進めるに当たり、本加工法の有用性に関する目処を得ることができました。ここに公益財団法人天田財団に心より感謝の意を表します。

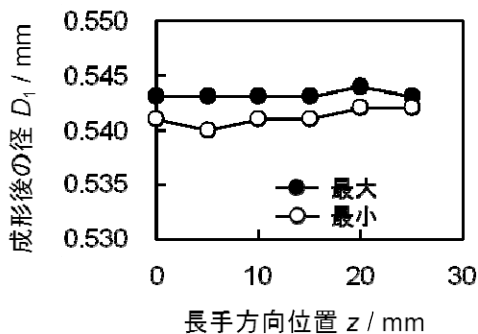
参考文献

- 1) 田代均ほか：まてりあ 44-6(2005), 495-502.
- 2) 日本金属学会：非鉄材料, (1987), 丸善.
- 3) 古島剛ほか：塑性と加工, 47-548 (2006), 870-874.
- 4) 梶野智史ほか：同上, 47-549(2006), 953-957.
- 5) 山下勉ほか：同上, 46-529 (2005), 161-165.
- 6) 日本塑性加工学会：塑性加工技術シリーズ 6, (1990), 68-72, コロナ社.
- 7) 近藤雅之ほか：鉄と鋼, 9-75, (1989), 49-55.
- 8) 久保木孝ほか弘匡弘匡弘匡弘匡：平 20 塑加春講論, (2008), 239-240.
- 9) 久保木孝ほか：塑性と加工, 50-582(2009), 650-654.
- 10) T. Kuboki et al.: COMPLAS X, (2009), Barcelona, 447-450.
- 11) T. Kuboki et al.: In-Tech 2010, (2010), Pague, Czech Republic, pp. 133-136.
- 12) T. Kuboki et al.: ICOMM 2011, (2011), Tokyo, Japan, pp. 279-284.
- 13) 久保木孝ほか, 53-622(2012), 1008-1012.
- 14) 容具昌幸ほか：塑性と加工, 10-104(1969), 627-634.



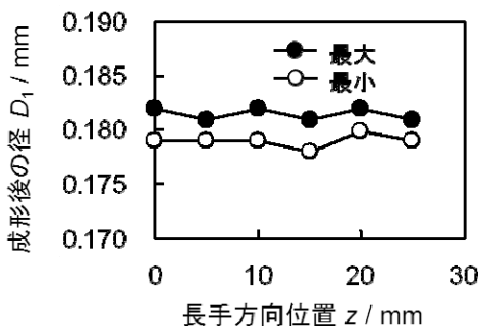
(a) 初期径 $D_0=1.0\text{mm}$

(後方張力 $T_B=45\text{MPa}$, ロール荷重 $F=22\text{N}$)



(b) 初期径 $D_0=0.6\text{mm}$

(後方張力 $T_B=45\text{MPa}$, ロール荷重 $F=9\text{N}$)



(c) 初期径 $D_0=0.2\text{mm}$

(後方張力 $T_B=45\text{MPa}$, ロール荷重 $F=9\text{N}$)

図 10 線材径に応じたへん平状態の変化