

超極細金線材のダイレス減径加工

電気通信大学 知能機械工学科

准教授 久保木 孝

(平成 18 年度一般研究開発助成 AF-2006003)

キーワード：極細線，フリーサイズ，減径

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。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¹⁾として期待されている。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。また、今後更なる超極細径材のニーズが発生すると超極細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もある。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⁾。

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。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した。

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同時に、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。

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。素材の応力-ひずみ線図を図 2 にしめす。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。ロールのプロファイル半径 r_c が小さいほど、線材とロールとの接触領域が長手方向に拡大し、且つ、周方向にも拘束力が加わる領域が拡大するため、安定した加工が可能となる。しかしながら、 r_c が小さくなり過ぎると、ロール中央部よりも端部での加工が強くなり、反対に、安定した加工はできない。幾何学的な検討と有限要素法を用いた事前検討により、孔形半径

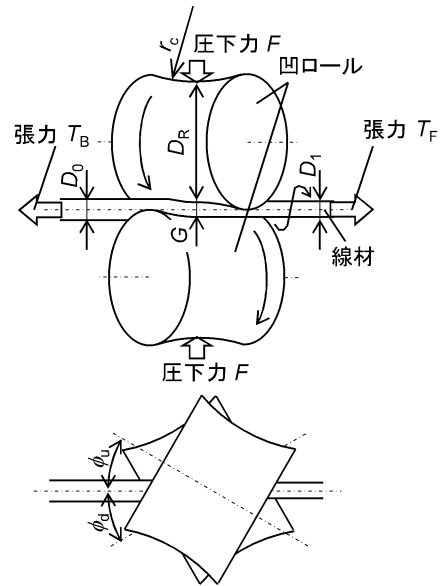


図 1 凹ロールを用いた伸線加工法概念図

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_R / rads^{-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 °C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 / deg.	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
	張力 T_F, T_B / MPa	0-36
	FEMでの送り	従動
	実験での送り f / mms^{-1}	13.1

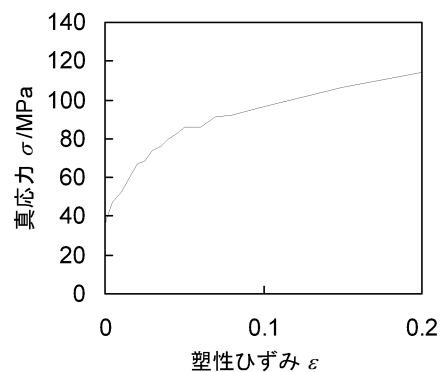


図 2 素材の応力-ひずみ線図

$r_c=25\text{mm}$ と決定した。

幾何学的検討の方法の概念図を図3に示す。線材軸に対して傾き角 ϕ を有するロール軸 z_R を、ロール最小半径と線材半径である $(D_R+D_0)/2$ だけ離れたところに配置する。ロール軸上の一点 A_i を含む平面を考え、この平面と線材軸との交点を W_i とする。 A_i と W_i を結ぶ直線と線材表面の交差する点を S_i とし、 A_i と S_i の距離をロール半径 r_{ci} と考える。この手順をロール軸上の各点に対して行い、ロール軸 z_R に対応するロール半径 r_{ci} を決定する。この手順によって決定されるプロファイル(以下、臨界プロファイルと称す)を用いると、クラッシュ $\delta_c=0$ のとき、ロールと線材は線接触する。

この有限要素解析には、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、動的陽解法を適用した。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、送りを与えられる。この有限要素解析モデルを用いて、プロファイル半径の検討の他、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(以下、減面率と称す)を得ることができたため、さらに、素材径を変更し、同一プロファイ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5に加工部本体の外観を図6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。

3. 研究成果

3.1 幾何学的検討結果

図7に示す幾何学的検討方法によって得られた、クラッシュ $\delta_c=0$ としたときに線接触となる臨界プロファイルを示す。また、同図にプロファイル半径を16.6mm一定とした形状を記入している。幾何学的計算による臨界プロファイルは、一定半径のプロファイルとして近似できることがわかる。

同様の手法により、線材径 $D_0=1.0\text{mm}$ に対して、ロール

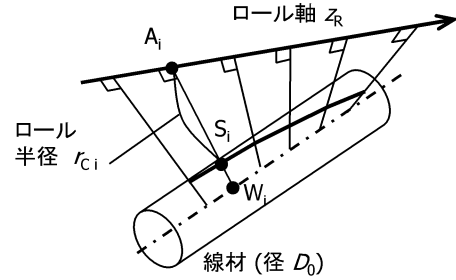


図3 幾何学的検討による臨界プロファイルの決定

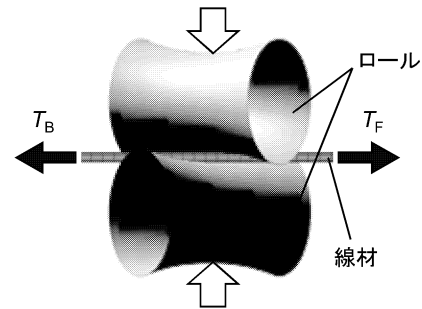


図4 有限要素法における解析モデル

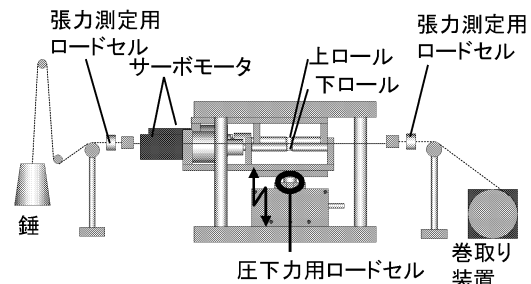


図5 凹ロールを用いた伸線機概念図

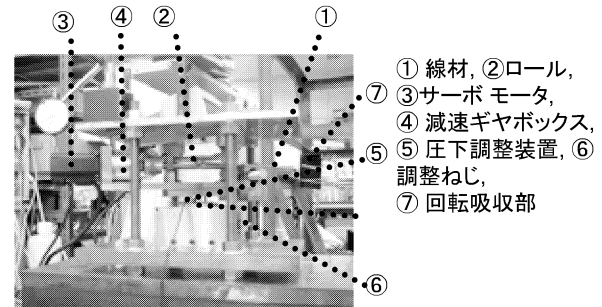


図6 試作機の加工部本体

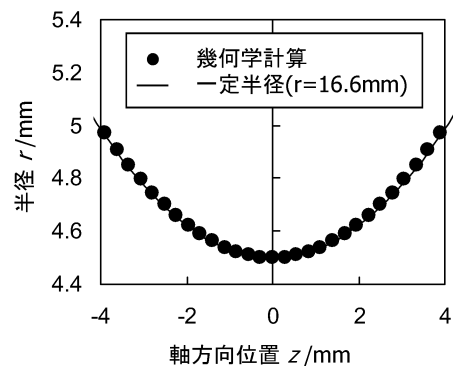


図7 線接触となる臨界プロファイル (線材径 $D_0=1.0\text{mm}$, ロール最小径 $D_R=10\text{mm}$)

最小半径 D_R を 4~20mm の間で設定し、幾何学的に臨界プロフィール形状を算出し、単一円弧で近似して、そのプロフィール半径 r_{cc} を求めた。結果を図 8 に示す。ロール最小径 D_R の増加にともない臨界プロフィール半径 r_{cc} は増加する。この臨界プロフィール半径ではクラッシュ $\delta_c=0$ のとき、線材とロールとの接触は線接触となる。この臨界プロフィール半径 r_{cc} よりもプロフィール半径 r_c が小さくなると、 $\delta_c=0$ であっても、線材とロールとは幾何学的に干渉する。もし、クラッシュ δ_c が 0 より大きくなるとこの幾何学的な干渉量は大きくなる。この臨界半径プロフィール r_{cc} よりもプロフィール半径 r_c が大きくなると、接触は楕円化する。接触域が楕円化すると、線接触に比べて、加工が徐々に行われると考えられる。そこで、以下の検討では、線材径 $D_0=1.0\text{mm}$ 、ロール最小径 $D_R=10\text{mm}$ に対して、臨界プロフィール半径 r_{cc} よりも大きいプロフィール半径 $r_c=25\text{mm}$ を採用した。

3.2 有限要素法を用いた検討結果

プロフィール半径 $r_c=25\text{mm}$ として、有限要素法を用いて、提案する新しい凹ロールを用いた伸線加工法によって加工が可能かどうかを検討した。図 9 に張力を付与しない場合に、クラッシュ δ_c が加工後の線材断面形状に及ぼす影響を示す。クラッシュ δ_c によらず、減径効果が認められない。

これは、線材がロール間隙が最も小さくなる適切な加工位置からずれたためと考えられる。図 9 に線材進行方向の前方から観察される加工中の線材の位置を併記する。線材はロール間隙が最小値 G となる位置になく、水平方向にずれた位置に存在し、「逃げ」が発生する。水平方向にずれた位置では、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、張力を付与することにより、線材をロール直下に拘束することを試みた。前方・後方張力 $T_F, T_B=36\text{MPa}$ に設定したときの、断面形状と、加工中の線材の位置を図 10 に示す。張力を付与することによって、減径効果が発現している。張力には二つの作用があると考えられ、一つは、ロール直下の適切な加工位置に線材を拘束する効果であり、もう一つは、線材そのものを長手方向に引き延ばすことによる延伸効果である。同じ、張力であるにもかかわらず、クラッシュを変更することによって、断面形状が変わる。しかも、クラッシュの小さい $\delta_c/D_0=0.1$ の方が、クラッシュの大きい $\delta_c/D_0=0.4$ に比べてより高い減径効果を達成している。つまり、張力とクラッシュには組合せによって、減径効果が変化すると考えられる。

そこで、より詳細な数値解析を実行し、クラッシュと張力の組合せ効果を検討した。以下では、次式で定義される減径率 R_d を用いて、減径効果を定量的に評価する。

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

ここで、 D_1 は加工後の線材径の周方向 4 箇所、軸方向 5

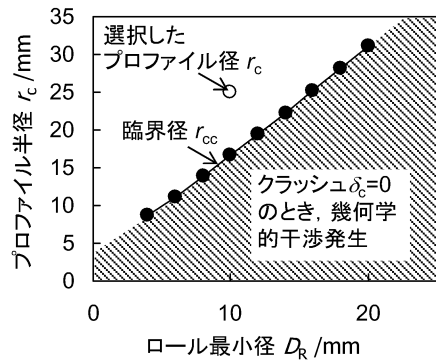
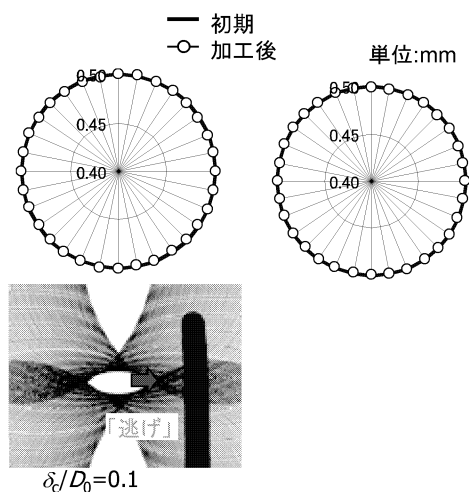
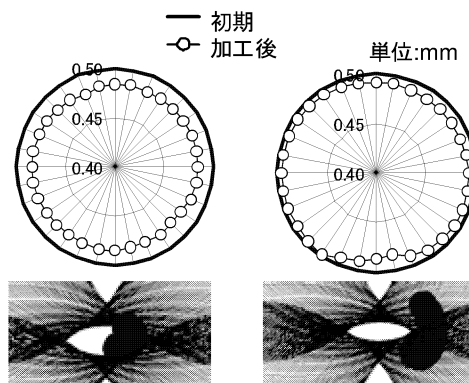


図 8 ロール最小径に伴う臨界プロフィール半径の変化(線材径 $D_0=1.0\text{mm}$)



(a) クラッシュ $\delta_c/D_0=10\%$ (b) クラッシュ $\delta_c/D_0=40\%$

図 9 クラッシュが加工後断面形状に及ぼす影響(線材径 $D_0=1.0\text{mm}$ 、張力 $T_F, T_B=0$)



(a) クラッシュ $\delta_c/D_0=10\%$ (b) クラッシュ $\delta_c/D_0=40\%$

図 10 クラッシュが加工後断面形状に及ぼす影響(線材径 $D_0=1.0\text{mm}$ 、張力 $T_F, T_B=36\text{MPa}$)

箇所，計 20 箇所の平均値である。

素材径 $D_0=1.0\text{mm}$ と 0.6mm での結果を図 11 に示す。張力とクラッシュとともに最適値を有する。張力が大きくなるにともない，線材の拘束効果と，延伸効果によって，減径率が増加する。しかしながら，張力が 45MPa を超えると，局所にくびれが発生して，解析が不可能であった。言い換えると，実加工では破断が生じると考えられる。

クラッシュが増加すると，減径率は一度増加するものの，最適値以上の値に設定すると，減少に転じる。これは，クラッシュを与えないと当然の事ながら，減径させることはできないが，クラッシュが大きくなりすぎると，線材に「逃げ」が発生し，線材が適正な位置で加工されないためと考えられる。このクラッシュ増加にともなう「逃げ」の増加は図 10 から確認できる。最も減径率が最大となる最適なクラッシュ量は張力とともに増加する。張力が増加することによって，張力による拘束効果が増加するため，線材の「逃げ」を抑制することができるためと考えられる。数値解析での最適条件は，張力 T_F ， $T_B=36\text{MPa}$ ，クラッシュ $\delta_c/D_0=0.3$ であり，この時，減径率 $R_d=7\%$ を達成できると予測された。

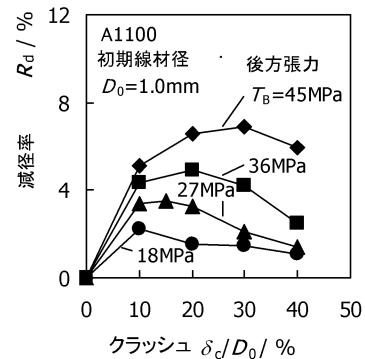
図 11(b) には，素材径 $D_0=0.6\text{mm}$ の結果を示す。注目すべきは， $D_0=1.0\text{mm}$ と全く同じロール形状を用いて，全く同じ条件で加工しているにもかかわらず，張力とクラッシュの組合せ効果は，素材径 $D_0=1.0\text{mm}$ とほぼ同様であることである。つまり，張力 T_F ， $T_B=36\text{MPa}$ ，クラッシュ $\delta_c/D_0=0.3$ であり，この時，減径率 $R_d=7\%$ 以上を達成できると予測された。

3.3 試作機を用いた検討結果

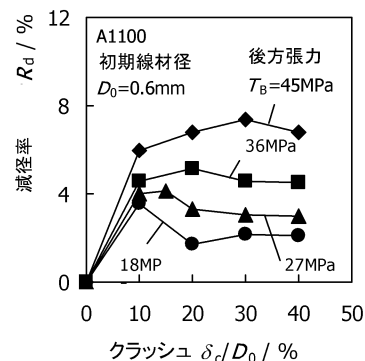
数値解析によって，予測された結果を検証するために，試作機を用いて加工実験を実施した。実験では，高精度な制御が難しいクラッシュ δ_c の代わりにロール荷重を測定して，評価する。検討結果を図 12 に示す

実験結果は，解析結果と定性的には非常に近い結果を得，定量的には期待以上の減径効果を得ている。張力の増加にともない減径率は著しく向上する，しかしながら，張力 T が， 45MPa を超えると線材が破断するため実験不可能であった。圧下力 F の増加にともない，一度，減径率は急激に増加するが，その後，減少する。この理由は，数値解析を用いて考察したとおり，圧下力 F が適正値を超えて，過大となると，線材に「逃げ」が発生し，ロール直下の適正な位置で線材が加工されないためと考えられる。また，最大の減径率が得られる圧下力の最適値は，張力の増加にともない大きくなる傾向にある。これも，前節で考察したように，張力の増加にともない拘束効果が増加するためと考えられる。

実験での最適条件は，素材径 $D_0=1.0\text{mm}$ の場合，張力 $T_B=36\text{MPa}$ ，ロール圧下力 $F=16\text{N}$ で，最大限径率 $R_d=0.11$ を得る。素材径 $D_0=0.6\text{mm}$ の場合，張力 $T_B=45\text{MPa}$ ，ロール圧下力 $F=22\text{N}$ で，最大限径率 $R_d=0.11$ を得る。これは，通常実施される穴ダイスを用いた引抜き条件での減径率に匹

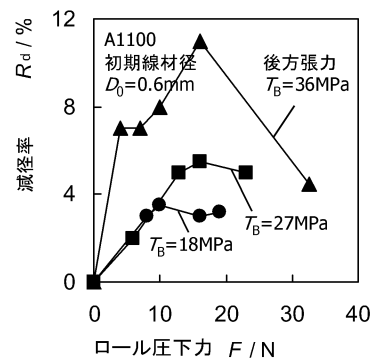


(a) 初期線材径 $D_0=1.0\text{mm}$

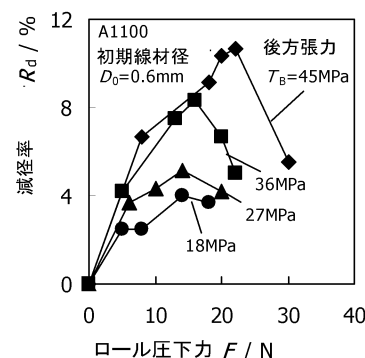


(b) 初期線材径 $D_0=0.6\text{mm}$

図 11 張力とクラッシュの組合せ減径効果(解析)



(a) 初期線材径 $D_0=1.0\text{mm}$



(b) 初期線材径 $D_0=0.6\text{mm}$

図 12 張力とクラッシュの組合せ減径効果(実験)

敵する。

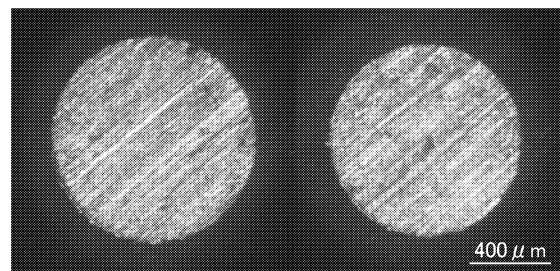
図 13 に、素材の断面形状と、最も高い減径率が得られた条件での、成形後の断面形状を示す。螺旋回転しながら進む線材に対して、逐次的に加工しているにもかかわらず、成形後の断面も比較的深遠に近いことが確認できる。

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～0.6mm の加工は可能である。

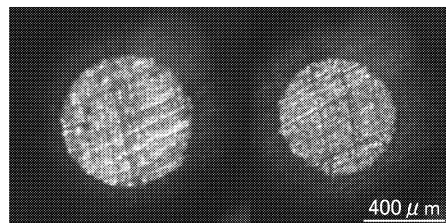
さらに、得られた数値解析結果を基に、試作機を作製し、提案した新しい伸線加工法の有効性を検証した。その結果、定性的には、解析結果と非常に良い一致を示した。さらに、定量的には解析以上の減径効果が得られ、最適条件下では、減径率=11%を達成した。この減径効果は、素材 1.0mm～0.6mm に対して、得られ、本加工法のフリーサイズ加工法としての有効性も確認された。また、本加工法は、ロール径 10mm に対して、その 10 分の 1 以下のオーダの径を有する線材の加工が可能である点でも有効であり、極細線加工実現に対して一定の目処を得たと考えている。

最後に、当初目的とした金の細線加工 (0.1mm) の加工を達成することはできなかった。現在、アルミニウムでは 0.2mm までの加工に目処を得ており、素材径 0.1mm のアルミニウムの加工確認を終了後、金の細線加工の実現可否を検討する予定である。



素材 成形後

(a) 素材径 $D_0=1.0\text{mm}$



素材 成形後

(b) 素材径 $D_0=0.6\text{mm}$

図 13 断面形状(実験)

謝 辞

本研究では天田金属加工機械技術振興財団のご援助により、新たな加工法の特徴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。ここに天田金属加工機械技術振興財団に心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 古島ほか：塑性と加工，47-548 (2006)，66-70
- 2) 山下ほか：塑性と加工，46-529 (2005)，161-165
- 3) 梶野ほか：塑性と加工，47-549(2006)，47-51
- 4) 近藤ほか：鉄と鋼，9-75，(1989)，49-55