



M. Murata

軸方向断面が変化する押し出し加工

村田 眞*

1. 緒言

材料や円管の均一な断面の長さ加工する方法として、押し出し加工がある。押し出し加工部材は、鉄道車輛等の工業部材として多く用いられている¹⁾。この押し出し部材を均一断面でない部材の要求も増え、これらの研究もいくつか見られる^{2)~5)}。その一つとして、内面にねじられた突起を持つ円管を実験的に試みた。

本研究は新しい内面螺旋溝付管押し出し加工法を提案する。設定したねじり角を 30° とし、大量生産が可能な押し出し加工法を見出した。本加工法は、マンドレルに螺旋状の溝を配置し、その状態で押し出しを実施することによって、加工中の材料流動に変化を与え、内面にスパイラルの突起を持つ円管を成形するものである。加工条件が管の内面に溝（突起）を螺旋状に多数成形した管に与える影響について、実験的に検討を加える。

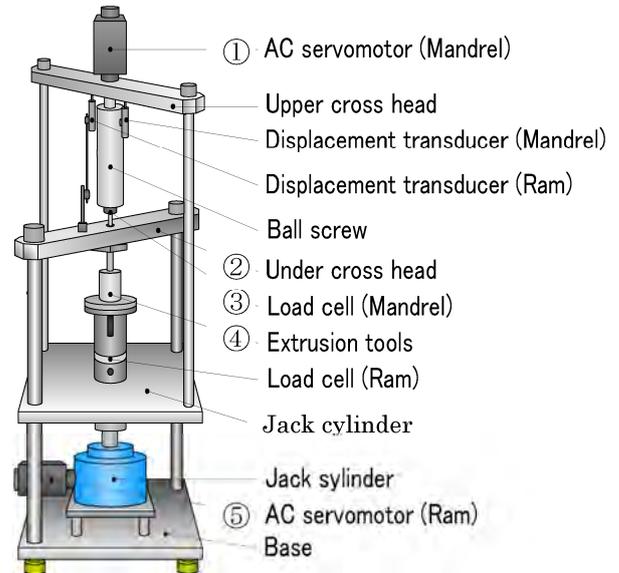


Fig. 1 Illustrated prototype extrusion machine

2. 加工原理および押し出し加工機

2.1 押し出し加工機

実験に用いた、設計し自作した押し出し加工機の構成を Fig.1 に示す。本押し出し加工機の主要部は駆動部（①⑤ ACservomotor）、計測部（②④Load cell）と押し出し工具部（③ Extrusion tools）によって構成される。ラムとマンドレルの位置は各々に取り付けた AC サーボモータによって制御されるため、互いの位置や速度によらず、独立して制御されている。押し出し加工中に作用する力として、マンドレルに作用する荷重はひずみゲージ②により、加工中の押し出し荷重をひずみゲージ④によって測定する。

Fig.2 に実験に用いた加工部を示す。マンドレルとダイスの位置関係は同図に示すようになっており、この押し出し加工で、マンドレルの先端とダイス出口部の距離はマンドレル高さ h (Mandrel height) である。それが、押し出された円管の形状にどのような影響を与えるかについて検討を加えた。ダイスの内径 $D_0=16.0\text{mm}$ で、マンドレルの外径は、 $d_0=14.0\text{mm}$ である。コンテナの内径は 42.0mm で、ダイスのベアリングの長さは 4.0mm である。押し出し比は約 27.7 である。マンドレル等の材質は、SKD61 である。使用したマンドレルの形状を Fig.3

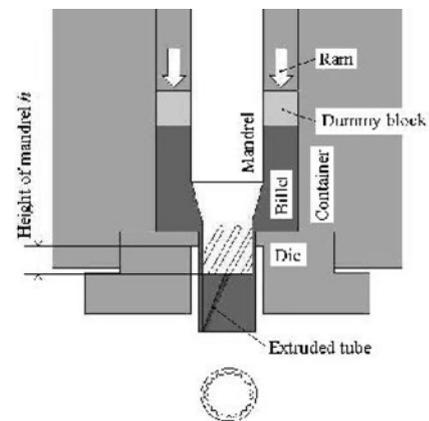


Fig. 2 Geometrical dimensions of extrusion parts

に示す。円管の内側に突起をつけるため、マンドレルには同図に示すように溝をつけている。この図に示すようにリード角 $\alpha=30^\circ$ で、溝数 $n=20$ 個である。マンドレルの溝は旋盤で切削加工し、溝深さ $f_0=0.8\text{mm}$ で、溝幅 $b_0=1.5\text{mm}$ である。この溝に被加工材が流れ込み、円管にねじられた突起となる。また、マンドレルの溝部長さ l_0 は、 40.0mm で、テーパ部のテーパ角度は 15° とした。Fig.1 から Fig.3 までの装置を使用して、押し出し加工によって、内面に多数のねじられた突起を持つ円管を製造した縦断面と斜め横断面の例を、Fig.4 に示す。同図に円管内面に作られた突起のねじれ角 α_1 を示す。加工条件はリ

* 電気通信大学大学院情報理工学専攻 教授

一ド角 $\alpha=30^\circ$ で、溝数 $n=20$ 個であり、鉛の再結晶温度は、室温より低いいため、条件に合ったスパイラルの突起を有する円管の製造の可能性を以下に検討する。

2.2 ビレットの材料

押し出し加工に用いたビレットの材料は、鉛 (JISH2105 特殊) である。室温における鉛の変形特性が、熱間加工におけるアルミニウムと似ており、鉛は熱間押し出し加工のモデル材料として適した材料であるため実験に用いた。ビレットとコンテナ間には潤滑材としてグリースを使用し、押し出し加工は室温で行った。引張強さは 14MPa である。圧縮試験 (ひずみ速度 $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) により求めた、降伏応力 (0.2%耐力) は 5.8MPa、ヤング率は 17.2GPa、ポアソン比は 0.44 である。ビレットの初期寸法は 40.0mm、内径 20.0mm、高さ 40.0mm の円筒形である。

3. 実験結果 検討

3.1 加工力

Fig.5 にラムのストローク S と押し出し荷重およびマンドレル荷重の関係図を示す。この荷重は、Fig.1 に示した計測部の二

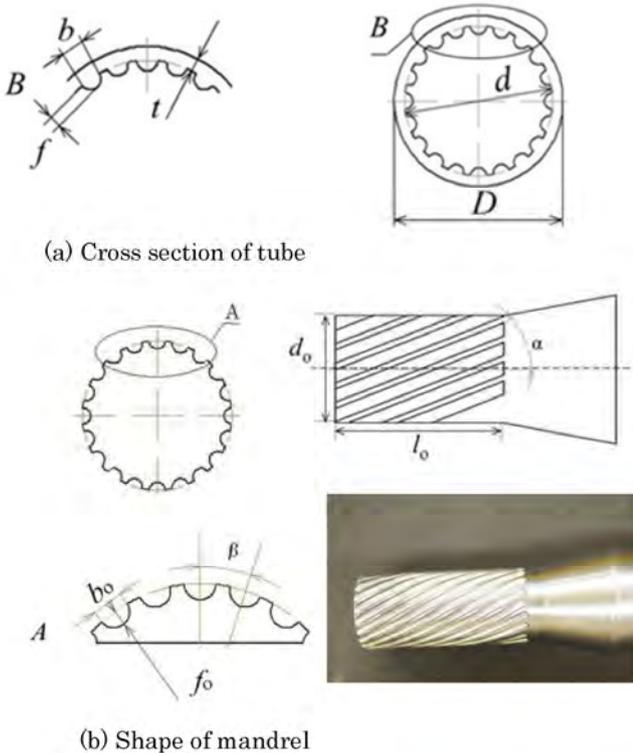


Fig.3 Illustration of mandrel for extrusion



Fig.4 Example extruded circular tube with many spiral projections on inside wall

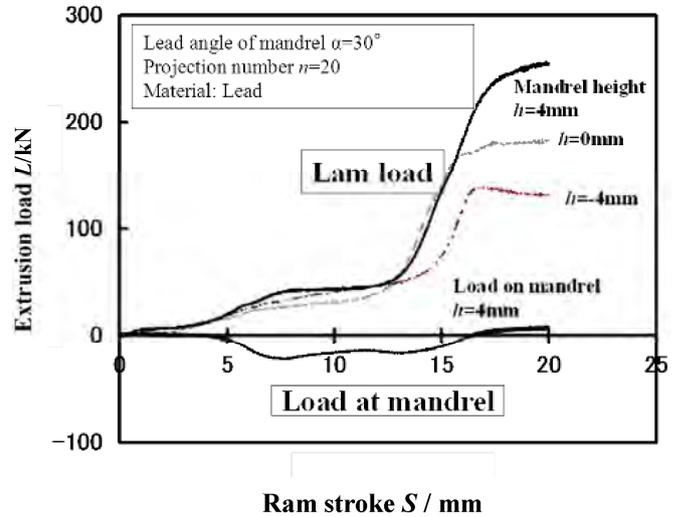


Fig. 5 Extrusion loads, mandrel load and Ram stroke

つの Load cell によって測定した。押し出し加工初期のストローク $S \approx 13\text{mm}$ ぐらいまでは、Fig.2 に示すようにマンドレルとコンテナ内の空いた空間に、ビレットが充満してゆくために、押し出し加工力は小さい。マンドレル高さ $h=-4\text{mm}$ のとき、ダイスベアリング部空間にマンドレルが存在しない状態のため、押し出されるビレットはマンドレルに妨害されることがない。そのため、押し出し加工力は最大で 130kN と小さくなっている。 $h=4\text{mm}$ になると、ビレットはダイスとマンドレルの隙間の円周状の狭い空間に押し込まれるため、押し出し加工力は最大で 250kN と大きくなっている。さらに、 $h>4\text{mm}$ となるとダイスによってビレットが、押し出しされていく状況はあまり変わらないため、ストロークと押し出し荷重の関係線図はほぼ同じ曲線となった。

マンドレル荷重について検討する。コンテナとマンドレルの空いた空間に、ビレットが充満してゆく押し出し初期では、マンドレルのテーパ部に作用する力の方向が、マンドレルを持ち上げる方向に働くため、Fig.5 に示すようにマンドレルを圧縮するような力が働く。その後、ストローク $S \approx 17\text{mm}$ 前後になると、ビレットがダイスより定常的に円管として押し出されるようになり、マンドレルの溝部等に作用する摩擦力が、マンドレルを圧縮する力より大きくなる。同図に示すようにマンドレルに引張力が作用する。しかし、押し出し加工力に比べて、この力はわずかで、約 10kN である。マンドレル荷重は、マンドレル高さ h が変化しても、荷重-ストローク線図はほぼ同じ形状となった。ここでは $h=4\text{mm}$ を代表値として表示する。押し出しの最大加工荷重とマンドレル高さ h の関係を表した図が、Fig.6 である。同図に示すように、 h がマイナスの場合は、ビレットはマンドレルに妨害されることがなく、ダイス穴に押し出されて行くため、押し出しの最大加工荷重は約 130kN となる。一方、 h が 2mm 以上となると、押し出されていく状況はあまり変わらないため、押し出しの最大加工荷重は約 260kN である。

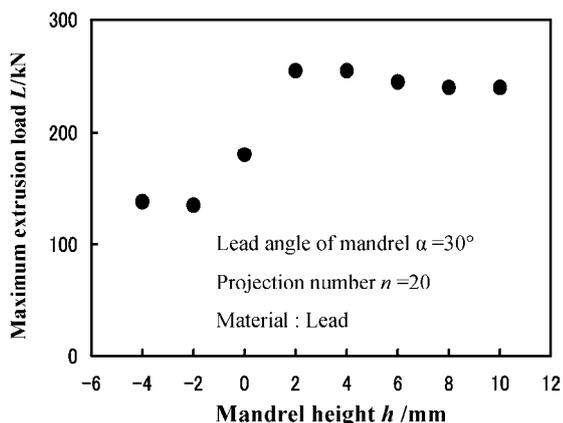


Fig.6 Relationship between maximum extrusion Load and mandrel height

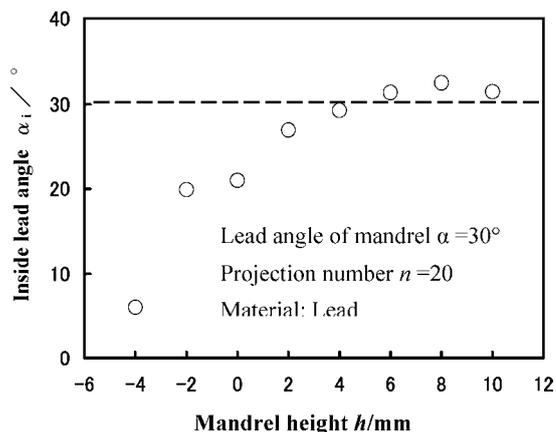


Fig.8 Relationship between inside lead angle and mandrel height

3.2 突起のねじれ角

Fig.7にマンドレル高さ $h = -4\text{mm}$ と $h = 8\text{mm}$ で、押し出し加工で製造した円管の写真を示す. 同図(a)は $h = -4\text{mm}$ とした時の、縦断面(左)と横断面(右)の写真である. 左の図に見られるように、円管内面に作られた突起のねじれ角 α_i は、マンドレルのリード角 $\alpha = 30^\circ$ よりかなり小さくなっている. さらに、右図で観察されるように、円管内面に作られた、突起の高さ f よりもマンドレルの溝深さの $f_0 = 0.8\text{mm}$ 方が、より

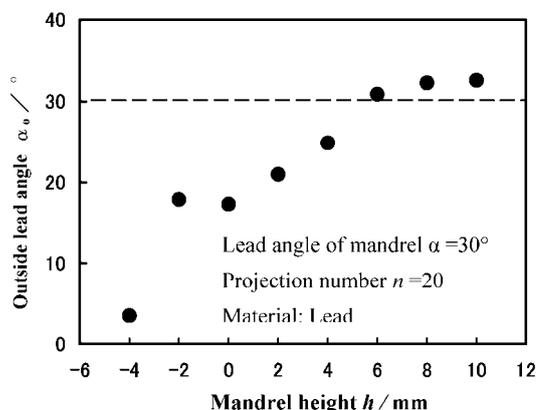
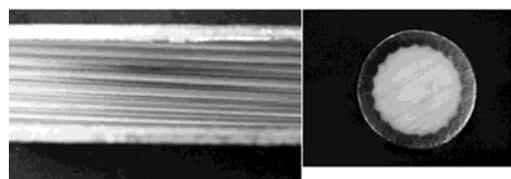
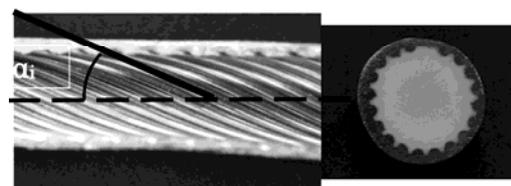


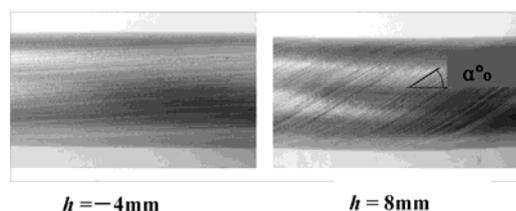
Fig.9 Relationship between outside lead angle and mandrel height



(a) Section of profile on extruded circular tube
Mandrel height $h = -4\text{mm}$



(b) Section of profile on extruded circular tube
Mandrel height $h = 8\text{mm}$



(c) Outside view of extruded circular tube

Fig.7 View of extruded circular tube with many spiral projections on inside wall

小さくなっている. 同図(b)は $h = 8\text{mm}$ 時の縦断面と横断面の写真である. この時の α_i は設定された角 30° とほぼ等しくなっている.

図から観察されるように、図(a), (b)に対応して、図(c)に示すように外表面には螺旋痕が観察され、そのねじれ角 α_o は図(a), (b)の突起のねじれ角 α_i とほぼ同じ値を取っている. この外壁に生ずる縞は模様として存在し、その高さは、 0.01mm 以下であった.

Fig.8にマンドレル高さ h と管内壁の突起のねじれ角 α_i の関係図を示す. 同図に見られるように、 $h = -4\text{mm}$ では、突起部のねじれ角 $\alpha_i \approx 4^\circ$ と突起部はほとんどねじれていない. $h \geq 6\text{mm}$ では、ねじれ角 $\alpha_i \approx 30^\circ$ となっている. これは $h \leq 4\text{mm}$ では、ダイス内壁によって、円管がねじられるのが妨害されるためである. とくに、 $h = -4\text{mm}$ では円管がねじられるのがほとんど抑制されている. しかし、 $h \geq 6\text{mm}$ では、溝付きマンドレルの一部が、ダイスより突き出しているため、この突き出した部分以降は円がねじられる加工のみがなされるため、同図に表される結果となる. 本押し出し加工において、円管がダイスより押し出される速度は、 2mm/s でありラムの速度よりかなり早く、円管にねじりの慣性が付き、管のねじりが

わずかではあるが過剰となる。そのため、突起部のねじれ角 α_i はマンドレル溝のリード角 30° よりわずかに大きくなったと考えられる。なお、設定したねじれ角 30° を破線で示す。以下の図についても、設定した値を破線で示している。

Fig.9 は、マンドレル高さ h と管外壁部に模様として生ずるねじれ角 α_o の関係図である。同図に示される様に、マンドレル高さ h とねじれ角 α_o の関係は、前述の突起部のねじれ角 α_i とほぼ同様な関係となっている。また、突起部のねじれ角 α_i の値と α_o の値はほぼ等しくなっている。

3.3 円管の外径と内径

マンドレル高さ h と円管の外径 D の関係を Fig.10 に示す。 $h=-4\text{mm}$ の場合は、ビレットがダイスに押出される時、マンドレルがビレットの流れを妨害しないため、ビレットはダイス内径より内側に回り込むように押出される。そのため円管の外径 D は、ダイス内径 $D_o=16.0\text{mm}$ より小さくなる。しかし、マンドレル高さ h が 2mm 以上となると、円管の外径 D は、ダイス内径 $D_o=16.0\text{mm}$ より 0.2mm 程度大きくなる。これは、Fig.8 で説明したと同様に、マンドレルの突き出し部分の溝(突起部)を乗り越え、ねじりの力が円管に作用するためである。

Fig.11 は、マンドレル高さ h と円管の内径 d の関係を表示した図である。Fig.10 で説明したのと同様な理由で、 $h=-4\text{mm}$ の場合は、円管の内径は $d \approx 12\text{mm}$ となりマンドレル外

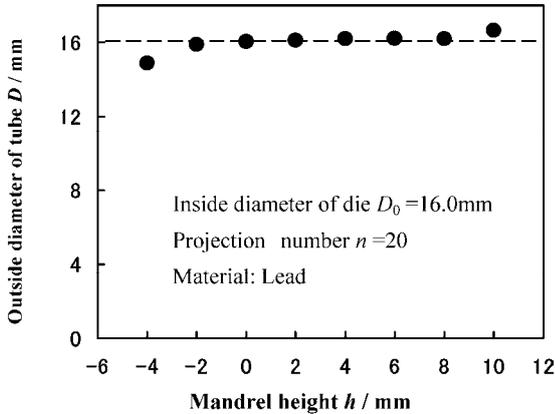


Fig.10 Relationship between outside diameter of tube and mandrel height

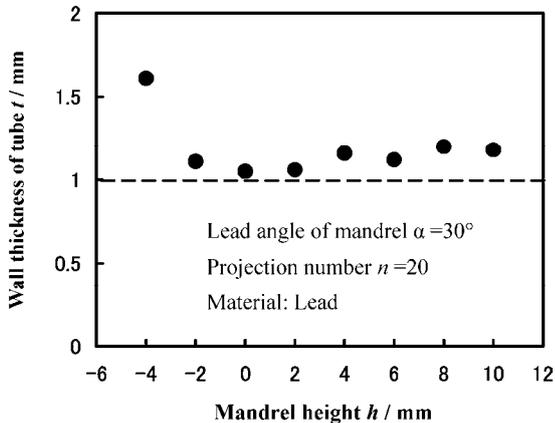


Fig.12 Relationship between wall thickness of tube and mandrel height

るためである。

マンドレル高さ h と押出された円管の突起の高さ f の関係を Fig.13 に示す。この場合も、マンドレル高さ $h=-4\text{mm}$ の場合は、Fig.7(a)の写真に見られるように、マンドレルの溝の深さ $f_o=0.8\text{mm}$ と設定しているのにもかかわらず、実際の突起の高さは $f=0.28\text{mm}$ と低くなっている。 $h \geq -2\text{mm}$ になると突起の高さ f はほぼ設定されたマンドレルの高さ f_o に等しくなり、 $h \geq 4\text{mm}$ では、設定された値となる。押出しの時にビレットに作用する押し圧力は 280MPa となり、引張強さの 20 倍となる。そのため、塑性流動を生じさせるのに比べて十分に大きく、マンドレルの溝も容易に塑性流動を生じさせる形状となっているためである。

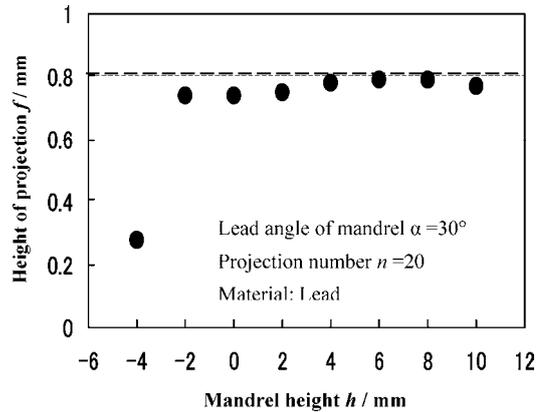


Fig.13 Relationship between height of projection and mandrel height

Fig.14 にマンドレル高さ h と突起の幅 b の関係を示す。同図に示すように、マンドレル高さが 4mm になると、突起の幅 b はほぼ設定された値となっている。押出し加工の場合は、加工条件の設定が良いと、その設定された溝に材料が入って塑性変形させるため、このような結果となった。この研究は、本来はアルミニウムでなされるべきであろう。ビレットが鉛とアルミニウム w で比較したものが Fig.15 である。同図に示されるように、ビレットの相異によって突起のねじり角 α_i の値が異なる。

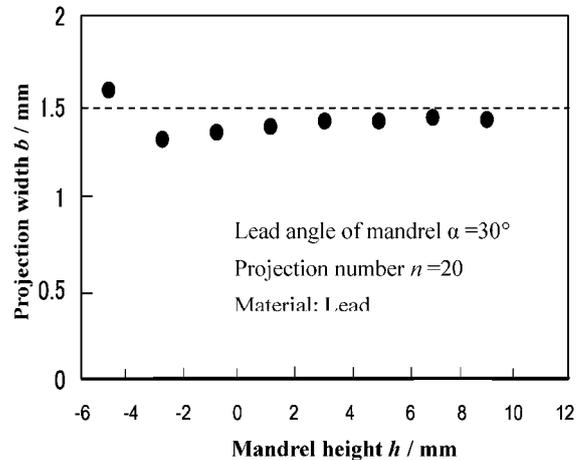


Fig.14 Relationship between projection width and mandrel height

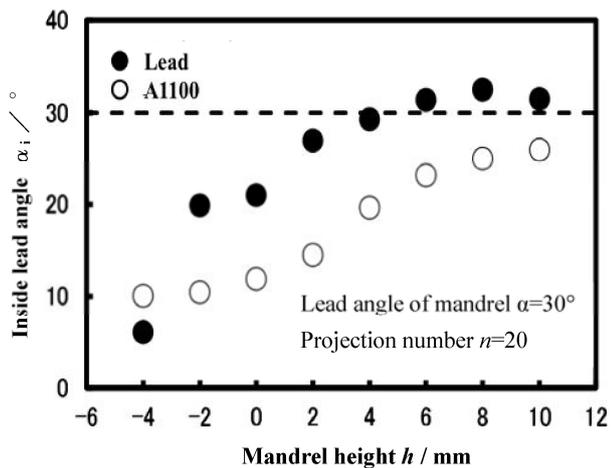


Fig.15 Relationship between height of projection and mandrel height

謝辞

本研究を支援していただきました公益財団法人天田財団に

対し、深く感謝の意を表します。また、この研究に辺り、実験装置の作成にご尽力いただきました当大学の荒川欣吾氏および実験とデータ処理のサポートをいただきました当大学研究室卒業生の稲川雄貴氏にお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本塑性加工学会編：押し加工，(1992)，1-8，コロナ社。
- 2) 新川真人・白石光信：塑性と加工，**50**-584(2009)，837-841。
- 3) 牧山高大・村田眞・久保木孝：塑性と加工，**45**-524(2004)，737-741。
- 4) 諸井努・村田眞・久保木孝：塑性と加工，**48**-554(2007)，234-238。
- 5) 高辻則夫・村上哲・長谷川豊・曾田哲夫・室谷和夫：塑性と加工，**49**-574(2008)，1086-1090。