

金属箔小型成形品の加工性

丸茂康男

(熊本大学 大学院自然科学研究科)

1. 緒言

電子機器や精密機器などの分野を中心として、部品の小型化および軽量化が進み、極薄板材料や箔材料を用いた極薄肉部品の塑性加工が重要となっており、これまでに、多くの研究や報告^{1)~24)}がなされている。

例えば、金属箔の基礎試験については、単軸引張り試験片形状と寸法の検討、金属箔の引張試験機の開発、引張試験と微小径液圧バルジ試験で電子部品用銅箔の降伏および破壊特性に関する報告がなされている。

金属箔の成形加工に関しては、しごき加工およびスピニング加工、およびマイクロピーンフォーミングに関する研究、また、アモルファス合金箔を用いた曲げ加工及び張出し加工、衝撃圧を利用した張出し加工、レーザー光や放電スパークを利用した曲げ加工やインクリメンタル成形に関する報告がなされている。

深絞り加工においては、板厚の成形性への影響を検討した研究、ダイスの超音波振動を利用した深絞り法の開発、ウレタンリングを用いる深絞り法の開発、マイクロ深絞り加工に関する研究、アルミニウム箔の水中放電成形に関する研究、圧電素子の微小振動によりしわ押さえ力を制御する深絞り法に関する研究など加工法の開発に関する研究が主に報告されている。また、ユニカルダイを用いた、銅板(板厚 0.3mm)およびアルミニウム板(板厚 0.4mm)の深絞りにおいて、これらの薄板を深絞り用冷間圧延鋼板と重ねあわせて深絞った場合のしわ抑制効果についても報告されている。

金属箔の深絞りにおいては、素板の極薄板化に伴って破断限界が著しく低下し、しわも発生しやすくなるので、これら二つの問題を同時に克服することが必要となる。このためには、金属箔厚の約数十倍程度の厚さの補助薄板や樹脂工具を利用して加工することが有効となる。本解説では、金属箔の深絞りの特徴を説明し、これに基づいて補助薄板や樹脂工具の成形性に及ぼす効果を述べる。

2. 素板厚としわ押さえ圧力

深絞りにおいては素板厚が薄くなるにつれ、しわが発生しやすくなるので、大きなしわ押さえ力が必要となる。しわ押さえ圧力の評価式として河合の式²⁵⁾や Siebelの式²⁶⁾などをあげることができる。極薄板を深絞りする際のしわ押さえ圧力の適当な評価式については検討を要するが、しわ押さえ力の計算に Siebelの式を適用すると、図 1 に示すように、板厚が薄くなるにつれてしわ押さえ圧力が増し、板厚が約 30 μm より薄くなるとしわ押さえ圧力は急増していることがわかる。なお、この場合の素板はステンレス鋼箔 (SUS304) を想定している。このしわ押さえ圧力の急増によって、深絞り時におけるフランジ部の摩擦抵抗も急増する。

また、ポンチ肩部での荷重負担は極薄板化とともに低下する。このため、成形性は著しく低下することが予想できる。

3. 素板厚と深絞り応力

金属箔の深絞り成形においては、板厚が薄くなることで深絞り応力がどの程度変化するかを把握することが重要となる。簡単のために、初等解析法で金属箔 (SUS304) の最大深絞り応力を見積もった結果を図 2 に示す。しわ押さえ圧力は Siebel の式で評価した。板厚が 25 μm より薄くなると、最大深絞り応力が急増することがわかる。これは、板厚が非常に薄くなるとしわ押さえ圧力が急増し、深絞り時におけるフランジ部の摩擦抵抗力の割合が増加するためである。これに伴い限界絞り比も急減する。

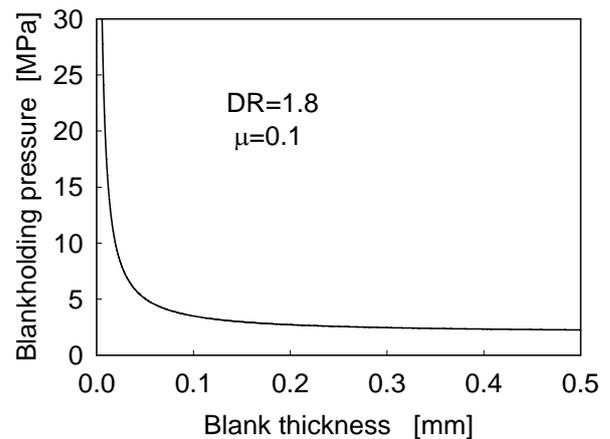


図 1 しわ押さえ圧力に及ぼす板厚の影響

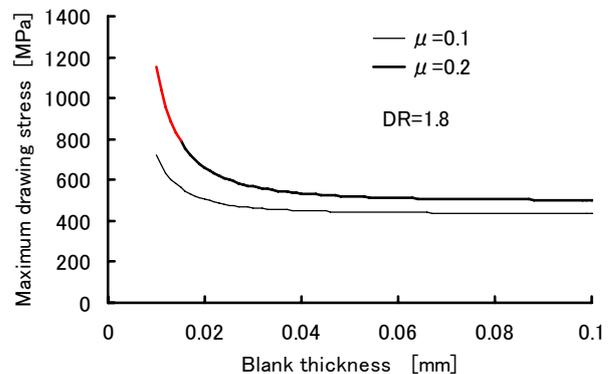


図 2 最大深絞り応力に及ぼす板厚の影響

4. しわ押さえ力負荷経路

極薄板や金属箔を深絞りする場合、素板厚が薄いのでしわ（座屈）抑制に必要な荷重（しわ押さえ力）が著しく大きくなる。これにともない必要な加工力も急増し加工品が破断しやすくなる。しわと破断を同時に抑制するためには、しわ押さえ圧力を行程中どのように負荷するかが重要となる。図3にステンレス鋼箔（板厚 30 μm ）、絞り比 DR=1.4、摩擦係数 $\mu=0.02$ の場合におけるしわ押さえ圧力許容負荷領域を示す。点線（破断限界線）と実線（しわ発生限界線）の間の領域が破断としわ発生を防止できる許容負荷領域となる。破断及びしわを防ぐためには、しわ押さえ圧力負荷経路が許容領域を通過するように負荷する必要がある。板厚が薄くなるほど許容負荷領域は狭まる。板厚が 15 μm と薄くなると、図4に示すようにしわ押さえ圧力許容負荷領域が狭くなる。

図5に板厚 $t=30\mu\text{m}$ 、絞り比 DR=1.8、摩擦係数 $\mu=0.02$ の場合のしわ押さえ圧力許容負荷領域を示す。図3及び図4と比較すると、許容負荷領域がさらに狭まっていることがわかる。絞り比が大きくなり、板厚が薄くなると許容負荷領域が狭まる。図6は板厚 $t=15\mu\text{m}$ 、絞り比 DR=1.8、摩擦係数 $\mu=0.02$ の場合で、破断限界線としわ発生限界線が重なり金属箔単独では成形が不可能となる。

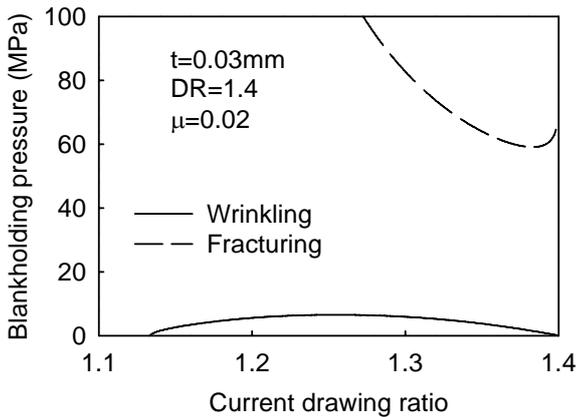


図3 しわ押さえ圧力の許容負荷領域

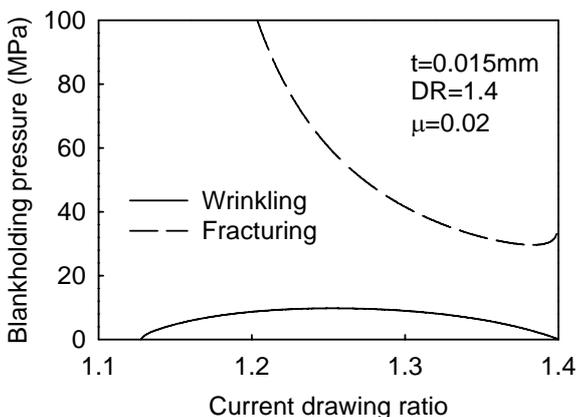


図4 しわ押さえ圧力の許容負荷領域

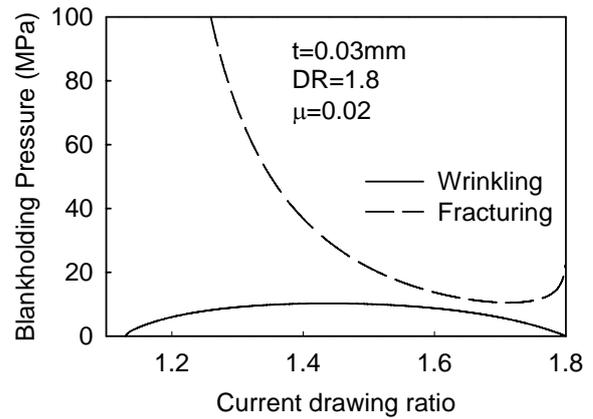


図5 しわ押さえ圧力の許容負荷領域

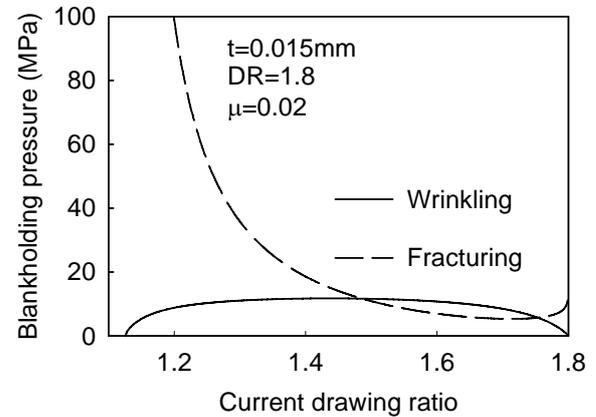


図6 しわ押さえ圧力の許容負荷領域

5. 金属箔の成形性

金属箔の深絞りにおいては、しわと破断には極薄板化及びしわ押さえ工具とダイスとの周方向の不均一接触が大きく影響し、工具の仕上げ精度、組立て精度やダイセットの動的精度の向上が成形欠陥の防止には重要となる。しかし、たとえこれらの問題が残っていたとしても、補助薄板や樹脂工具を利用して金属箔を深絞ることで、極薄板化の影響や不均一接触等の問題を比較的容易に克服することができる。以下に、金属箔の深絞り性に及ぼす補助薄板や樹脂工具の影響を解説する。

5.1 補助薄板の効果

金属箔素材としては、強度、耐食性および耐久性に優れ、様々な分野で利用されているステンレス鋼箔を用いた。深絞り試験では、ステンレス鋼箔に補助薄板を重ねて深絞りを行う。図7に補助薄板、金属箔素板および深絞り工具との位置関係を示す。Mode(A)は金属箔を補助薄板ではさんだ場合、Mode(B)では金属箔はダイス側、補助薄板がしわ押さえ板側である。

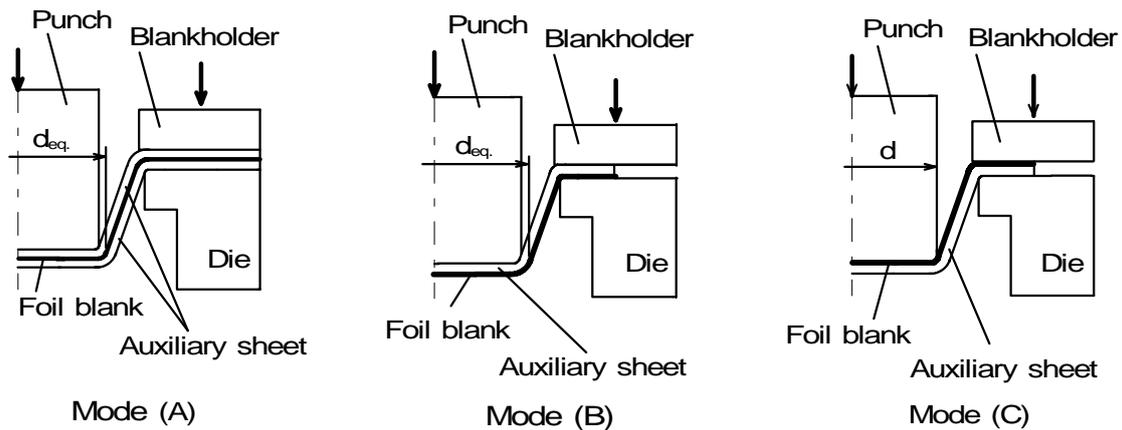


図7 深絞りにおける金属箔素板，補助薄板及び深絞り工具の位置関係

Mode(C)では金属箔はしわ押さえ板側，補助薄板がダイス側である．補助薄板には工業用純アルミニウム薄板硬質材（板厚：0.2mm）を用いた．

鉱油に微細なテフロン粒子を分散配合させた潤滑油を用いて，素板フランジ部のみを潤滑した．金属箔の素板直径 D を重ね板厚を考慮した等価ポンチ直径 d （ポンチ直径+重ね板厚の2倍）で割って無次元化し絞り比 DR で表す．

図8に各 Mode ごとステンレス鋼箔の深絞りの結果を示す．Foil は箔のみの深絞り結果を示す．図中のそれぞれの記号は下記に示すように深絞りの結果を示す．

- ：金属箔深絞り容器が壁部のしわも破断も無く深絞れた場合．なお，口辺部のしわは無視する．
- △：金属箔深絞り容器の壁部にしわが発生した場合．
- ：補助薄板は破断せず，金属箔素板のみが破断した場合．
- ：金属箔素板と補助薄板が破断した場合．金属箔のみの深絞りにおいて金属箔が破断した場合も含めている．

図から明らかなように補助薄板を用いないステンレス鋼箔の深絞りでは，深絞り容器にしわが発生している．Mode (C)では，しわ抑制が見られないが，Mode (A)及び Mode (B)の場合は，しわ抑制効果が見られた．しわ押さえ板側の補助薄板は，しわ抑制効果を示す．この抑制効果の影響は最大深絞り荷重にも現われている．図9は，Mode(B)及び Mode(C)における最大深絞り荷重の変化を示している．図中の横軸は金属箔素板直径とポンチ直径の比を表している．いずれの素板直径においても補助薄板がしわ押さえ板側にある場合 (Mode(B)) の最大絞り荷重が，補助薄板がダイス側にある場合 (Mode(C)) よりも大きいことがわかる．これは，しわ押さえ板側の補助薄板のしわ抑制の働きが深絞り荷重に反映していると考えてよい．

補助薄板がしわ押さえ側にある場合，補助薄板は金属箔とともにダイス穴に絞り込まれていく．金属箔は加工中，フランジ部からダイス肩部にわたって補助薄板とダイスの拘束を受けることになり，しわが抑制さ

れる．しわ抑制に必要な荷重分が絞り荷重に加わると考えられる．補助薄板がダイス側にある場合は，金属箔へのしわ抑制の効果は働かないので，絞り応力は補助薄板がしわ押さえ側にある場合よりも低くなっている．

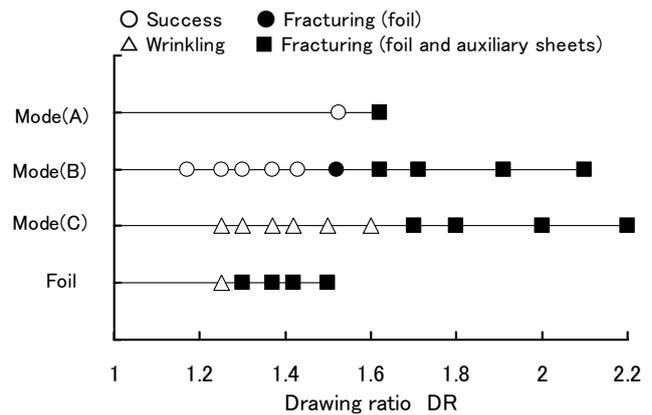


図8 金属箔深絞りに及ぼすアルミニウム補助薄板の効

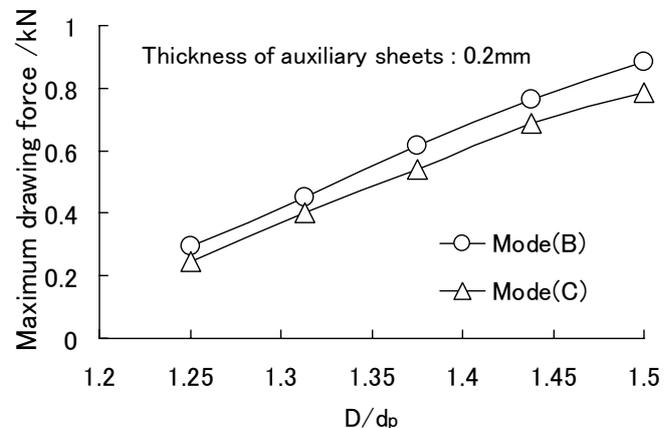


図9 最大深絞り荷重に及ぼす補助薄板の影響

補助薄板の金属箔深絞り及び効果を下記のようにまとめることができる。

(1) 補助薄板がしわ押え側にのみにある場合、補助薄板は金属箔とともにダイス穴に絞り込まれるので、金属箔は加工中、フランジ部からダイス肩部にわたって補助薄板とダイスの拘束を受け、しわが抑制される。補助薄板は可変形のしわ押え工具の働きをする。ダイス側の補助薄板にはこのようなしわ抑制の働きはない。

(2) 補助薄板がダイス側にある場合は、補助薄板がポンチ肩部付近での金属箔の破断を防ぐ効果が期待できる。

(3) 金属箔のみを深絞る場合、金属箔フランジ部にはダイス面、しわ押え面からの摩擦力が作用する。一方、補助薄板をしわ押え板側のみに置くと、金属箔フランジ部はしわ押え板面と接触しないので金属箔フランジへ作用する摩擦力は低減される。

5. 2 しわ押さえ力の影響

図 10 にしわ押え力の影響を示す。補助薄板 0.2mm の硬質材と軟質材を用いた場合を示す。この場合では、潤滑を良好にするために、潤滑剤として鉱油に微細なテフロン粒子を分散配合させた潤滑油とテフロンシートを利用した。

図から硬質材を用いたほうが小さいしわ押え力でしわ抑制が可能であることがわかる。金属箔フランジにはしわ押え板からの荷重と加工荷重に相当する荷重がしわ押え側の補助薄板を介して作用することになる。硬質材の場合、加工荷重が軟質材より大きく、補助薄板を介して金属箔フランジ部に作用するしわ押え力も大きくなると考えられる。

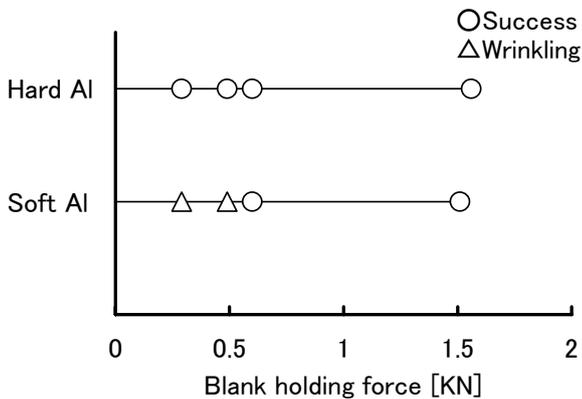


図 10 しわ抑制に及ぼす補助薄板の効果

5. 3 樹脂補助薄板と樹脂工具の効果

図 11 に、樹脂補助薄板 (Nylon66) とテフロン製のダイスを利用した場合の深絞りの模式図を示す。ここでは、ポンチとダイスの工具クリアランスが金属箔と補助薄板の板厚の合計より小さく設定されている。そのため、深絞り行程中に樹脂工具が弾性変形し、ダイス肩部から壁部にかけて金属箔容器が板厚方向に圧縮を受け、しわ抑制効果が高められるようになってい

る。一方、ダイスはテフロン製であるため、壁部での板厚方向への圧縮が生じて摩擦力の絞り荷重増加への影響を小さくできるので、破断を回避できる。図 12 に純銅箔 (板厚 50 μ m) を Mode(B) で深絞りを行った場合の結果を示す。樹脂工具及び樹脂補助薄板を用いることで、しわを抑制することができる。

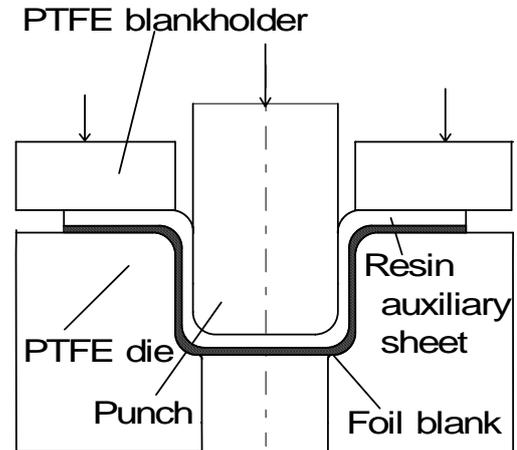


図 11 テフロン製ダイス、ナイロン 66 補助薄板を用いた金属箔深絞りの模式図

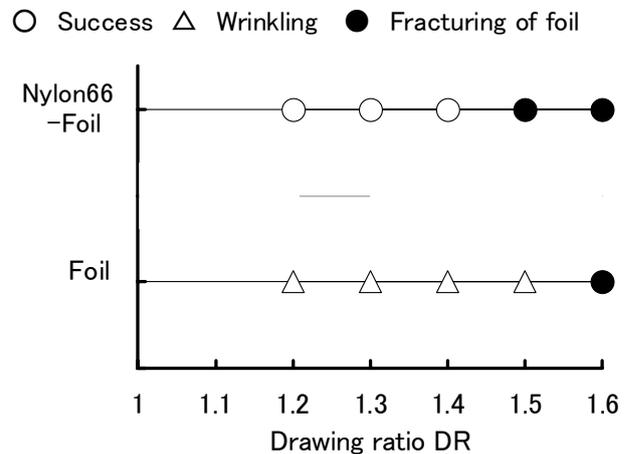


図 12 銅箔深絞りにおけるテフロン製ダイス、ナイロン 66 補助薄板のしわ抑制に及ぼす影響

6. 結言

金属箔の深絞りを行う場合、素板の極薄板化に伴って破断限界が著しく低下し、しわも発生しやすくなる。また、しわ押さえ工具とダイスとの周方向の不均一接触も素板厚が極薄になると、しわと破断の発生に大きく影響する。そのため、工具の仕上げ精度、組立て精

度やダイセットの動的精度の向上が成形欠陥の防止には重要となる。さらに、極薄板化にともない破断としわが生じないしわ押さえ圧力許容負荷領域は狭まるので、しわ押さえ圧力負荷が、許容負荷領域内を通過するための工夫が必要となる。欠陥のない成形を行うためにはこれらの問題を乗り越えることが必要となる。

一方、上記の問題が残されていても金属箔厚の約数十倍程度の厚さの補助薄板や樹脂工具を利用して加工することで、しわと破断の発生を比較的容易に防ぐことができる。たとえば、補助薄板をしわ押さえ板側に配置すると、補助薄板が金属箔とともにダイス穴に絞り込まれる過程で、金属箔はフランジ部からダイス肩部にわたって補助薄板とダイスの拘束を受けてしわが抑制される。このとき補助薄板は可変形にしわ押さえ工具の働きをする。また、樹脂補助薄板と樹脂工具を利用し、工具クリアランスを金属箔素板厚と樹脂補助薄板厚の合計より小さくして深絞ることで、壁部の拘束が強まりしわ抑制効果が得られる。このように、金属箔を成形する場合は、補助薄板や樹脂工具を効果的に利用することで、比較的容易に成形欠陥を防ぐことができる。

参考文献

- (1)山口克彦・高倉章雄・吹上 忠・福田正成, 17-191,(1976), 995-1002.
- (2)早乙女康典, 大崎功二, 伊藤明俊, 天田重, 第 42 回塑性加工連合講演会講演論文集,(1991), 227-230.
- (3)黒崎 靖, 竹内宏之, 村井健一, 機論, 58-550, C(1992), 1999-2004.
- (4)斎藤正美・濟木弘行・河合 望, 機論, 54-504, C(1988), 1919-1925.
- (5)斎藤正美, 塑性と加工, 33-379, (1992), 923-929.
- (6)斎藤正美, 塑性と加工, 33-379, (1992), 977-982.
- (7)青木 勇, 塑性と加工, 33-379, (1992), 983-986.
- (8)S. Suto, K. Matsuno, T. Sano, K. Matsui, 33-3,(1992),215-227.
- (9)S. Suto, T. Sano, Y. Tashima, Advanced Technology of Plasticity, 3, (1993),1846-1851.
- (10)淵澤定克, 陳 綿 奈良崎道治, 白寄 篤, 第 46 回塑性加工連合講演会講演論文集, (1995), 217-218.
- (11)長坂一徳・梅木好助・杉本正勝, 塑性と加工, 11-108, (1970), 38-42.
- (12)岡崎康隆・川口憲治, プレス技術, 27-8, (1989), 80-85.
- (13)高倉章雄・エムワルディ・今谷勝次・山口克彦, 第 4 3 回塑性加工連合講演会講演論文集, (1992), 137-140.
- (14)早乙女康典・松井浩幸・加賀 廣・松崎俊雄, 昭和 63 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (1988), 87-90.
- (15)早乙女康典・安田 要・伊東明俊・天田重, 平成 5 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (1993), 585-588.
- (16)横井 真・桐村 剛・長谷部忠司・今井田 豊, 材料, 44-500, (1995), 602-607.
- (17)春日幸夫, 精密工学会誌, 62-12, (1996), 1737-1741.
- (18)中村和彦, 福井伸二第 23 回塑性加工連合講演会講演論文集, (1972), 145-148.
- (19)鎌田征雄, 塑性と加工, 29-326, (1988), 226-231.
- (20)住友秀彦, 塑性と加工, 33-379, (1992), 904-909.
- (21)K. Fujimoto, M. Yang, M. Hotta, H. Koyama, S. Nakano, K. Morikawa, J. Cairney, J. Materials Processing Technology, 177, (2006), 639-643.
- (22)M. Otsu, T. Wada, K. Osakada, Ann.CIRP, 50-1, (2001), 141-144.
- (23) Y. Saotome, T. Okamoto, J. Materials Processing Technology, 113, (2001), 636-640.
- (24) 田中繁一, 中村 保, 塑性と加工, 42-489, (2001), 38-42.
- (25) 河合 望, 新版塑性加工学, (1988), 朝倉書店.
- (26)E. Siebel and H. Beisswanger, Tiefziehen, (1995), 26, Carl Hanser Verlag.