

箔の重ね合わせによる限界張出し深さの向上

豊田工業高等専門学校 機械工学科
 教授 小林政教
 (平成4年度研究開発助成 AF-92022)

1. 研究の目的と背景

近年、マイクロエレクトロニクス等の発展にともない、電子部品や精密機械部品の小型化、薄肉化の要求がだんだんと厳しくなっている。このような要求は極薄板の塑性加工分野においても同様で、プレス加工やマイクロ加工に適用されようとしている。板厚の薄肉化は、引張試験における伸び特性の著しい低下をもたらす。そのために成形限界の低下をもたらす。さらに、しわの発生が大きな問題となる。極薄板の深絞りに関する実験的研究は、長坂ら(1)の報告がある。板厚の減少は、材料の破断限界の低下を、深絞り成形ではLDRの減少をもたらす。純粋張り出し成形では、限界張り出し深さの減少となる。(2) また、黒崎ら(3)は銅箔を用いて、引張試験やバルジ試験を行っている。金属箔の重ね合わせ法による深絞りの研究として、丸茂ら(4)(5)の報告がある。しかし、フランジ部を完全にクランプする純粋張り出し成形に関するこのような研究は見当たらないと思われる。

本研究では、アルミニウム箔(板厚0.02mm)及び銅箔(板厚0.035mm)をそれぞれ自身2枚重ね、またはそれより厚いブランク(工業用純アルミニウム薄板、板厚0.2mm)を接着することなく単に重ねて張り出し加工を行った。これにより、極薄板の成形性の格段の向上が得られた。

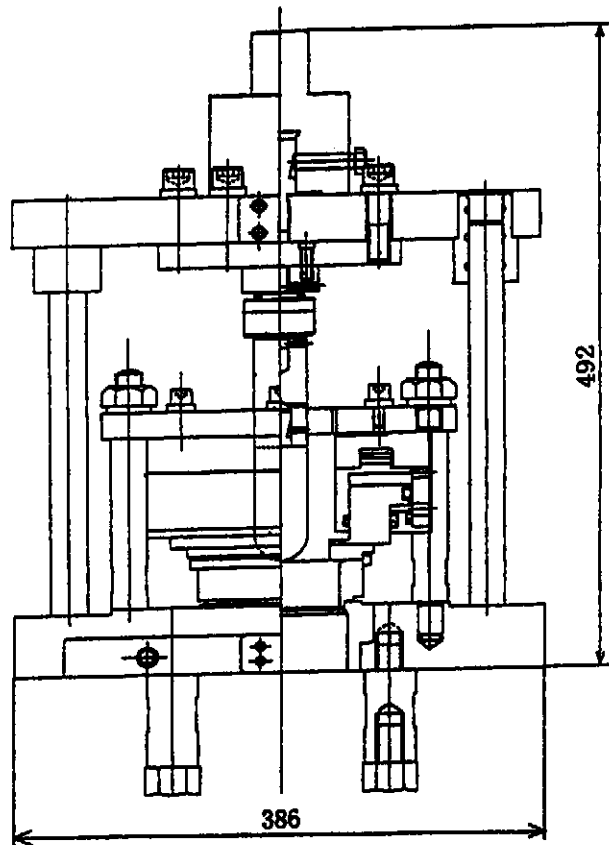


図1 張出し実験装置

2. 実験方法

図1は、今回用いた張出し実験装置である。パンチは油圧で駆動されるダイセットに取り付けられており、リレー回路とパソコンを使い、実験装置全体の動きを制御している。

また、工具主要部は、直径40mmの球頭パンチ、ダイスは穴径43mm、肩半径5mmである。そして、油圧式ブランクホルダーによって、最大76kNを加えることができ、試料を完全にクランプしている。また、今回の実験では、パンチ速度は0.15mm/sである。試料は一辺88mmの正方形である。パンチ力は容量2kNのロードセルによって測定し、パンチ行程はデジタルリニアゲージで測定した。デジタルリニアゲージはストローク100mmで最小目盛0.01mmである。

パンチとブランク間の潤滑はテフロンシートにマシン油を塗布し、全実験一定とした。

表1は今回用いた試料の一軸引張り特性値である。板厚0.02mmのアルミニウム箔の全伸びが非常に小さい値を示した。板厚0.035mmの銅箔のr値は板面内の変化が小さい。

表1引張り特性値

Metals	Testing direction	Tensile strength (MPa)	Total elongation (%)	n-value	r-value
Al(0.02mm)	0°	64	4.1	0.248	0.33
	45°	60	10.8	0.282	0.77
	90°	67	6.7	0.279	0.96
	Mean	68	7.6	0.284	0.71
Al(0.2mm)	0°	73	22.4	0.300	0.64
	45°	67	53.4	0.294	2.64
	90°	74	37.3	0.335	0.48
	Mean	70	41.6	0.306	1.60
*Al(0.2mm)	0°	100	27.7	0.269	0.68
	45°	81	39.2	0.283	2.73
	90°	89	33.9	0.304	0.41
	Mean	88	35.0	0.282	1.61
*Al(0.6mm)	0°	97	26.0	0.280	0.87
	45°	82	48.5	0.281	1.59
	90°	91	36.2	0.285	0.64
	Mean	88	39.8	0.279	1.12
*Al(1.0mm)	0°	90	41.7	0.281	0.88
	45°	81	49.5	0.282	1.15
	90°	85	49.5	0.285	0.76
	Mean	85	47.5	0.280	0.93
Cu(0.035mm)	0°	182	26.0	0.287	2.19
	45°	212	25.1	0.197	2.10
	90°	188	22.3	0.283	2.08
	Mean	201	24.5	0.256	2.11

注) *:過去の実験データを引用

3. 実験結果

3.1 板厚と限界張出し深さの関係

限界張出し深さに及ぼす板厚の影響を調べた。図2は、アルミニウムの場合について、各板厚に対する限界張出し深さの関係を示す。板厚が厚いほど、限界張出し深さは大きいことがわかる。また、一軸引張りにおいて板厚の増加は伸び特性を増加させることが、一般的に云われている。今回の純粋張出しにおいても、板厚の増加は限界張出し深さを増加させることが、実験的に確かめられた。

3.2 重ね合わせ法による限界張出し深さの向上

次に、ひずみの進行を遅らせたり、破断危険部にひずみが集中することを抑制したりして破断限界を制御する方法として、試料を重ね合わせること考えた。そして、限界張出し深さに及ぼす重ね合わせの影響を実験的に調べた。今回、試料を重ね合わせの場合、各試料の圧延方向をそろえた。この際、パンチとブランク間の潤滑はテフロンシートにマシン油を塗布した。ブランクとブランクの間には、潤滑剤を用いず、単に重ね合わせただけである。異種材料または板厚の異なるブランクを重ね合わせの場合、成形後そのブランクが内側となるか、外側となるかは限界張出し深さに大きく影響することが考えられる。伸び特性の異なるブランクを重ね合わせた場合、成形後外側になるブランクに内側になるブランクより伸び特性の良いブランクを用いた場合に、内側ブランクの限界張出し深さが増加した。その逆は効果がなく、むしろ

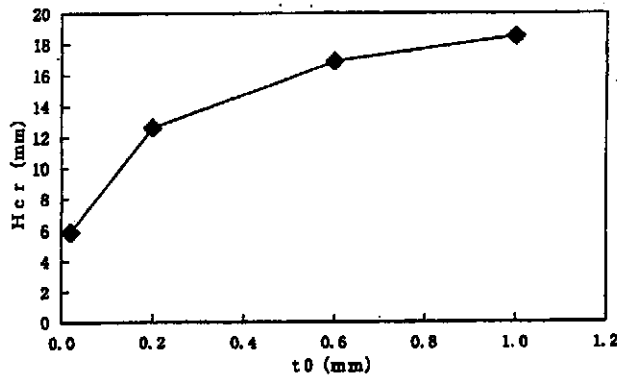


図2 限界張出し深さに及ぼす板厚の影響 (アルミニウム)

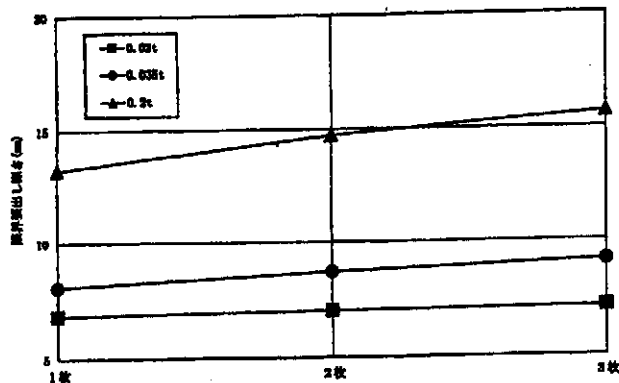


図3 限界張出し深さに及ぼすブランク枚数の影響

低下した。そこで、ここでは成形後内側 (パンチ側) になるブランクを考察の対象とする。

図3は、同種材料の重ね合わせに対する限界張出し深さの関係を示す。ブランク枚数が3枚までは、いずれの試料に対しても重ねた枚数と共に限界張出し深さが増加した。また、2枚重ねの場合内側と外側の試料は全て同時に破断していることも、破断直前のブランクを観察することによって確認した。(6) したがって、重ね合わせの方法で極薄板材料の限界張出し深さを向上させることが示唆された。

3.3 円周ひずみ分布における重ね合わせの影響

今まで、同種材料のブランクを重ね合わせるることによって限界張出し深さが向上することを見てきた。

限界張出し深さが大きいことは、局部的なひずみだけでなく、パンチ接触部領域全体にひずみが分布していると考えられる。そのため、張出し成形後のひずみ分布を調べてみた。厳密にはひずみの3成分 (円周ひずみ、板厚ひずみ、半径ひずみ) を考える必要があるが、ここでは、板厚が非常に薄いため、板厚ひずみの測定が不可能であるため円周ひずみ ϵ_θ に注目して考察する。

ブランクの圧延方向とそれに直角方向の同心円上に、直径2~42mmの範囲に2mm間隔に印を付け、圧延方向及び直角方向の変形前後の直径寸法の変化より円周ひずみ ϵ_θ を求めた。また、円周ひずみは限界張出し深さまで張出したブランクについて測定した。重ね合わせの場合、成形後内側になるブランクに注目して考察する。また重ね合わせの場合、例えば図中の記号Cu+Cuの左側は、成形後外側になるブランクを、右側は成形後内側 (パンチ側) になるブランクを意味する。

図4は、銅箔1枚の場合、銅箔2枚を重ね合わせた場合及び銅箔にアルミニウム薄板 (板厚0.2mm) を重ね合わせた場合の円周ひずみ分布を示す。図5は、アルミニウム箔 (板厚0.02mm) 1枚の場合、アルミニウム箔2枚を重ね合わせた場合、アルミニウム箔に銅箔を重ね合わせた場合及びアルミニウム箔にアルミニウム薄板 (板厚0.2mm) を重ね合わせた場合の円周ひずみ分布を示す。図4及び5より、1

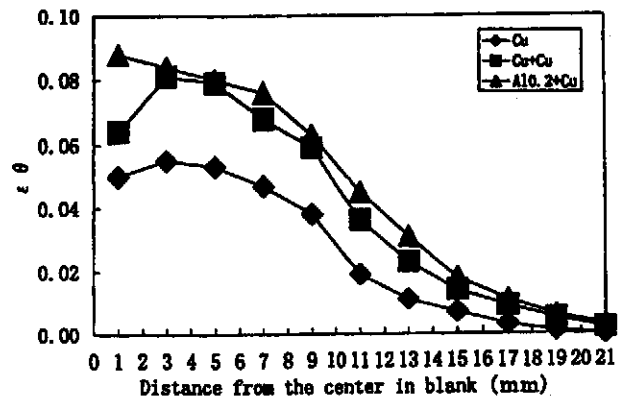


図4 銅箔の重ね合わせに対する円周ひずみ分布

枚だけの場合に比べ、重ね合わせた場合、円周ひずみがパンチ接触部全体に大きく分布していることがわかる。したがって、このようにパンチ接触部の広い範囲で円周ひずみが、大きくひずんだために、1枚のときよりも重ね合わせることで限界張出し深さも増大したと思われる。

3.4 ブランク間の潤滑剤の影響

今まで、同種のブランクの重ね合わせ、または異種のブランクの重ね合わせによって、限界張出し深さが増加することを見てきた。その際、重ね合わせたブランクとブランクの間には、潤滑をしないで、単に重ね合わせるだけであった。そこで、次にブランク間を潤滑することを考えた。潤滑剤として摩擦係数の小さいテフロンシートにマシン油を塗布（以下PTFE+M. O. と表す）した場合、逆に摩擦係数の大きい場合として松脂を塗布した。この場合、各潤滑

剤の摩擦係数は、表2の通りである。(6) この中で無潤滑の場合に対する摩擦係数は文献(7)を参考にした。

また、パンチとブランク間の潤滑は、今までと同様テフロンシートにマシン油を塗布した。そして、限界張出し深さに及ぼす潤滑剤の影響を調べた。図6は、銅箔に銅箔を重ねた場合について、ブランク間の潤滑剤の違いによる限界張出し深さの変化を示す。どの潤滑剤に対しても1枚のときに比べて限界張出し深さが、向上していることがわかる。その効果はPTFE+M. O. のときが最も小さく、松脂のときが最も大きい。また、図7は、潤滑剤の摩擦係数による各々の重ね合わせの限界張出し深さを示す。これより、ブランク間の摩擦が限界張出し深さに、大きく影響することがわかる。

次に、潤滑剤の違いによる円周ひずみの変化を調べた。図8は銅箔を2枚重ねた場合の潤滑剤の違いによる円周ひずみ分布を示す。図9はアルミニウム箔に銅箔を重ねた場合を示す。これらの図より、ブランクを重ねた場合、潤滑剤の違いがパンチ接触部領域の円周ひずみ分布に影響を及ぼしていることがわかる。すなわちブランク間の摩擦が大きくなるとパンチ接触部全体の円周ひずみ分布が大きくなる

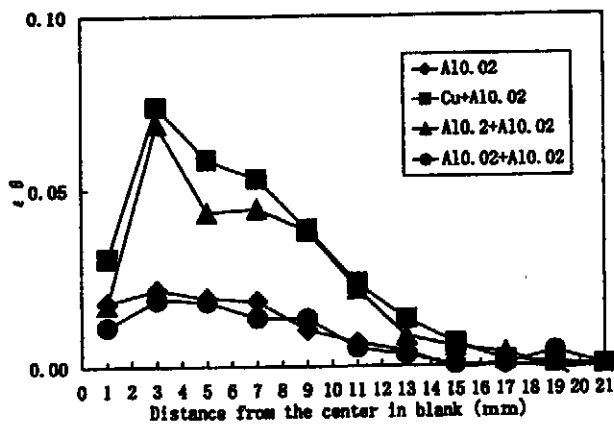


図5 アルミニウム箔の重ね合わせに対する円周ひずみ分布

表2 潤滑剤の摩擦係数

	Aluminum	Copper
PTFE+M. O.	0.020	0.028
Giving no lubricant	0.35	0.35
Rosin	0.530	0.514

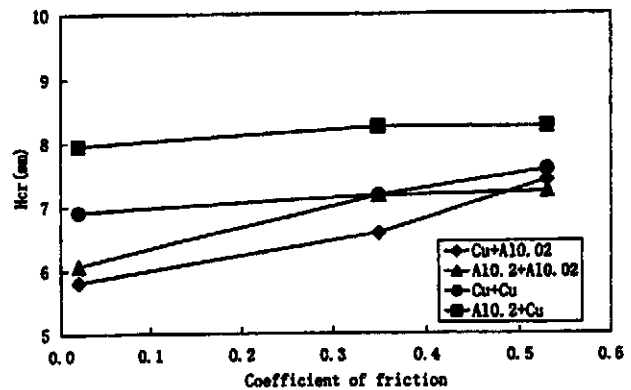


図7 各々の重ね合わせ法に対する限界張出し深さに及ぼす潤滑剤の摩擦係数の影響

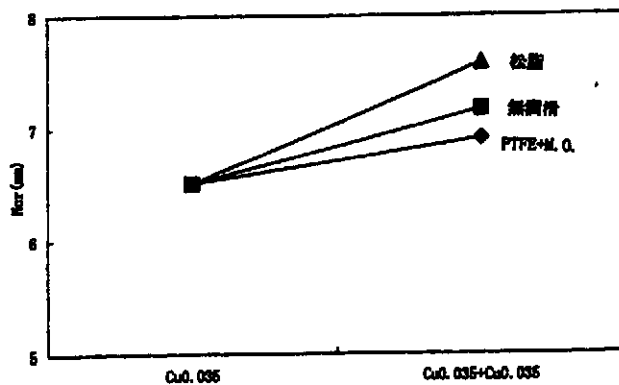


図6 銅箔2枚を重ね合わせた場合の限界張出し深さに及ぼす潤滑剤の影響

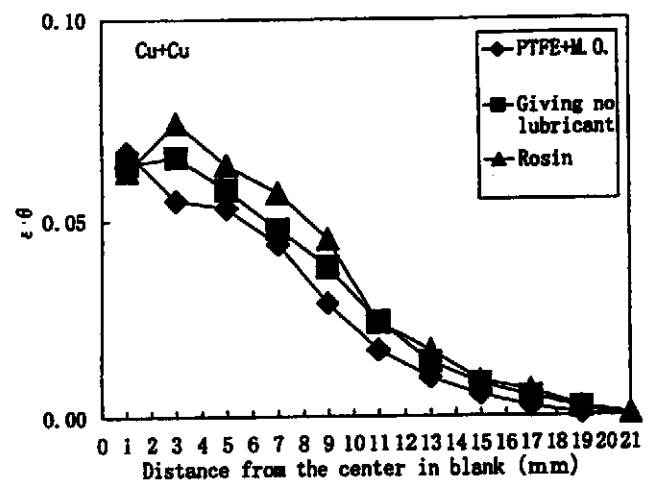


図8 銅箔2枚を重ね合わせた場合のブランク間の潤滑剤の違いによる円周ひずみ分布

ている。これが結果的に限界張出し深さの増大になったものと思われる。そして PTFE+M. O.、無潤滑及び松脂の順に円周ひずみが大きくなっている。これは、潤滑剤の摩擦係数の大きさと一致した。このことから、限界張出し深さを向上させるためには、パンチ接触部全体に円周ひずみを大きくすることが必要であり、それにはブランク間に摩擦の大きい潤滑剤を用いればよいことが示唆された。

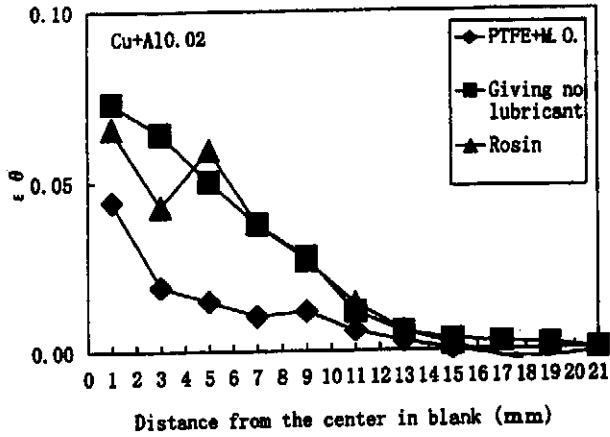


図9 アルミニウム箔に銅箔を重ね合わせた場合のブランク間の潤滑剤の違いによる円周ひずみ分布

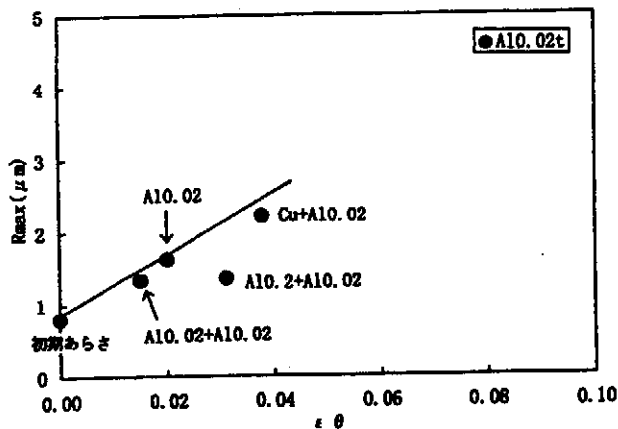


図10 表面あらさと円周ひずみの関係(アルミニウム箔内側)

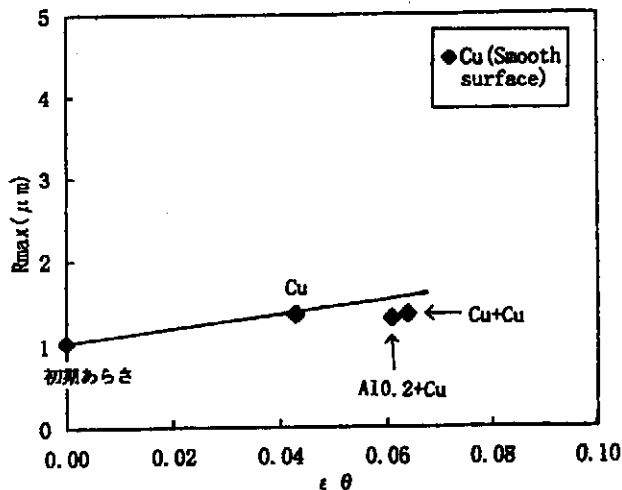


図11 表面あらさと円周ひずみの関係(銅箔内側)

3.5 円周ひずみと表面あらさの関係

一般に変形の進行と共に、ブランクの表面があることが知られている。その場合、表面あらさは相当ひずみに比例することが報告されている。(8) そこで、ここでも張出し成形における円周ひずみと表面あらさが比例すると仮定して以下議論する。そこで、ブランクを重ね合わせる実験の場合における内側ブランクの表面あらさの変化を観察した。実験条件は今までと同様、ブランクが1枚の場合、同種材料の重ね合わせ及び異種材料の重ね合わせの場合について限界張出し深さまで張出したときの内側ブランクの破断部近傍の円周ひずみ $\epsilon \theta$ と表面あらさ R_{max} の関係を調べた。

図10は、アルミニウム箔が成形後内側になるようにした場合の表面あらさと円周ひずみとの関係を示す。前述のように円周ひずみと表面あらさは比例すると考え、初期あらさと1枚だけで張り出した場合の表面あらさを直線近似する。そうすると、図10において、アルミニウム薄板(板厚0.2mm)を重ね合わせた場合の破断部近傍の表面あらさの大きさは、この直線関係からはずれ、ひずみの大きさに比べ表面あらさは小さくなっている。このことが、結果的に重ね合わせの方法による限界張出し深さの向上になったものと考えられる。図11は、銅箔の場合について、同様の結果を示す。この場合もアルミニウム箔の場合と同じ様な結果が得られた。

5. 結 論

アルミニウムの薄板(板厚0.2mm)、アルミニウム箔(同0.02mm)、銅箔(同0.035mm)を用いて純粋張出し成形を行い、限界張出し深さを向上させるための条件を実験的に調べ、以下のような結果を得た。

1. 同種同板厚もしくはそれ以上の伸び特性を持つ試料と重ね合わせることによって、限界張出し深さの向上が得られた。
2. 重ね合わせの効果は、円周ひずみ分布を調べることによって実験結果を説明できた。
3. ブランク間の潤滑剤を変化させた場合、PTFE+M.O.、無潤滑、松脂の順に限界張出し深さが大きくなった。これは、ブランク間の潤滑剤の摩擦係数の大きさの順と一致した。
4. ブランク間の潤滑剤の違いが、円周ひずみ分布に影響を及ぼすことがわかり、それは潤滑剤の摩擦係数の大きさに依存している。
5. 表面あらさは、円周ひずみ $\epsilon \theta$ が大きくなるほど増加した。また、重ね合わせの方法によって、表面あらさの発達が抑制され、それが限界張出し深さの向上に寄与したものと思われる。

6. 謝 辞

本研究は財団法人天田金属加工技術振興財団の平成4年度研究助成を得て行われました。財団に対し深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 長坂, 梅木, 杉本, 板厚と限界絞り比の関係, 塑性と加工, Vol. 11, No. 108, PP. 38-42.
- 2) 小林, 黒崎, 河合, 金属薄板の純粋張出し深さに及ぼす板厚の影響, 機論C, Vol. 55, No. 516, PP. 2221-2227.
- 3) 黒崎, 竹内, 飯田, 電子部品用銅箔の降伏及び破壊特性, 平元年塑加春講論, PP. 425-428.
- 4) 丸茂, 済木, 坂本, 坂田, ステンレス箔の重ね板深絞り, 平3年塑加春講論, PP. 247-250.
- 5) 丸茂, 済木, 坂本, ステンレス箔深絞りにおける重ね板の効果, 第42回塑加連 講論, PP. 763-766.
- 6) Kobayashi M., Kurosaki Y. and Kawai N., Effect of Thickness on the Pure Stretchability of Aluminum Sheets, Tran. ASME, vol 112, November, pp. 340-345, 1990.
- 7) 機械工学便覧改訂第6版(合本) p. 3-33, 1977.
- 8) 山口, 西村, 高倉, 福田, 変形の進行に伴う板厚の不均一さの進展(表面あれを考慮した金属薄板の変形限界評価I), 塑性と加工, 21-231, pp. 315-322, 1980.