

アルミニウム合金温間絞り加工用潤滑剤としての 高分子材料の特性評価と適用性

塩見友雄* 宮 正光**

1. 緒 言

アルミニウム合金は軽量化、リサイクル材料として自動車や家電業界での需要の拡大が期待されており、この板材の成形性向上を図るため様々な加工技術の研究・開発が行われている。本板材の温間絞り加工法は、破断しやすいポンチ肩部を冷却すると同時にフランジ部の変形抵抗を減少させるためダイおよび板押えを加熱するプレス加工法であり、絞り性を向上させることが可能と考えられる。この温間絞り加工法は実用化されてまだ日が浅く最適な潤滑剤は確立されておらず、今後の開発が期待されていた。ステンレス鋼や軟鋼の温間絞り加工においては、加工条件が百数十度であるため従来のやや耐熱性のある潤滑剤で十分であった¹⁾。例えば、有機ホウ素化合物と合成油をベースとした潤滑剤は、ステンレス鋼に対して優れた潤滑性能を有するが耐熱性は120℃程度である。一方、アルミニウム合金の引張強さ、耐力、伸びの変化およびr値、n値といった材料特性は図1²⁾に示す通りであり、加工温度は200～300℃が適当と考えられステンレス鋼等に比べ高温であるため通常の絞り加工用潤滑剤ではその耐熱性において問題があった³⁾⁴⁾。

そこで、絞り加工性の向上を目的にどのような素材が潤滑剤に適用可能かを最近の作業環境の問題を考慮した非黒鉛系への移行ならびに環境汚染に対する問題などを前提に、工業材料のうちで自己潤滑性が高い高分子に着目し検討を行った。

2. 実 験

2.1 試料

高分子系潤滑剤として各種高分子シートを使用し、比較のための潤滑剤には、市販の水溶性温間絞り加工用潤滑剤「ユニコン414K」(石原薬品株)ならびに油性潤滑剤G750とG6360(株日本工作油)を1:1で混合したもの、および(株日本工作油が温間絞り加工用に開発した水溶性潤滑剤G2576を用いた。実験2.2の高分子のコーティングには次の試薬を用いた。ポリビニルアルコール(PVA)は、(株クラレ製PVA-217(重合度1,700、けん化度88%)を、polysulfone(PSF)はScientific polymer products社製をそのまま用いた。シリカゲル粉末は、和光純薬工業(株)製ワコーゲルB-0(薄層クロマトグラフ用、粒径325mesh以下)、ポリテトラフルオロエチレン(PTFE)粉末はエンジンオ

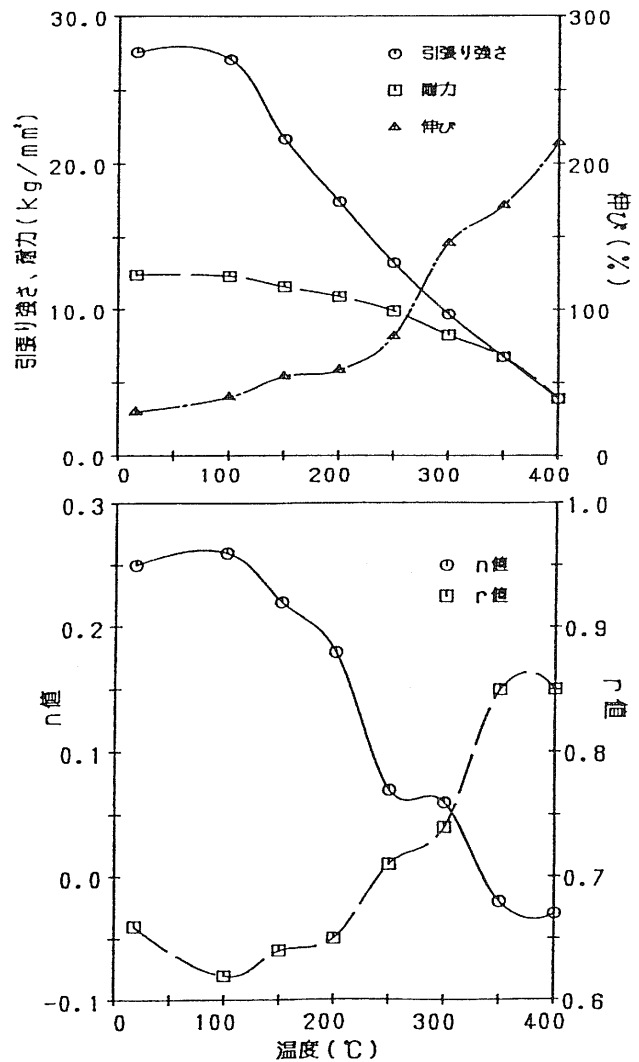


図1 アルミニウム合金の引張試験結果およびR値、n値²⁾

イル添加剤としてパワーハウスアクセル社より市販されているものを、その他の試薬は市販の特級品を用いた。

2.2 加工板への高分子のコーティング

高分子のコーティングは、予め清浄した加工板にPVA,PSFを各々の溶媒でポリマー濃度3(w/v)%に調製しこの懸濁液を加工板に流延させた後、加工板を垂直にし余分な溶液を垂れ流し、次いで加工板を水平に保持させ溶媒を蒸発除去するキャスト法により表裏両面について行った。PVAの溶媒は水を、PSFの溶媒にはクロロホルムを用い、

溶媒の蒸発除去は室温にて行った。PTFE、シリカゲルの粉末を高分子と同重量を加えた溶液をキャスト法によりコーティングしたものについても温間絞り加工を行った。なお、PVAの場合はPTFE粉末の懸濁を容易にするため、少量のメチルアルコールを用いた。また、高温用潤滑剤として古くから知られているなたね油（ニッコー製油（株）製）および台所用合成洗剤（花王（株）ファミリーフレッシュ）を加工板に塗布し温間絞り加工に供した。同時に、両者各々の潤滑剤にPTFE粉末を1 (w/v)%添加したものについても評価した。

2.3 円筒深絞り試験

温間絞り試験は図2に示した金型構成による30ton油圧複動プレスを改良したメカトロプレスを用いた。表1に示した金型条件および成形条件により、アルミニウム合金板（A5182S、1.0mm厚）の表裏それぞれに高分子シートを置く方法ならびに実験2.2の方法により予め高分子をコーティングした試験板を用い、絞り比2.0と一定にし室温から250℃の各温度で円筒深絞り試験を行った。

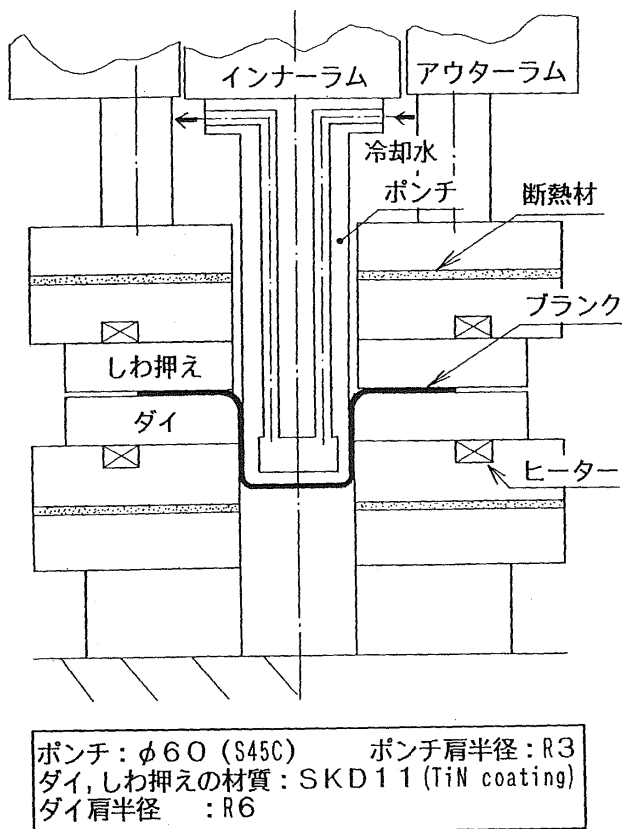


図2 金型構成図

3. 結果と考察

3.1 高分子シートによる温間絞り加工

表1に示した条件で円筒深絞りを行ったときの各温度におけるポンチのストロークと絞り力の関係、PTFEシー

項目	成形条件
金型材質	SKD11 Ti : コート
ポンチ外径	60mm
加工板材	アルミニウム合金 A5182S (板厚1.0mm 120mmφ)
成形温度	20~250℃
ポンチ	0℃ (但し、ダイ、しわ押えが 室温の場合はポンチも室温)
絞り比	2.0 (ブランク径120mmφ)
深さ	45mm
加工スピード	3.3mm/S
しわ押え力	1.0ton

表1 金型条件および成形条件

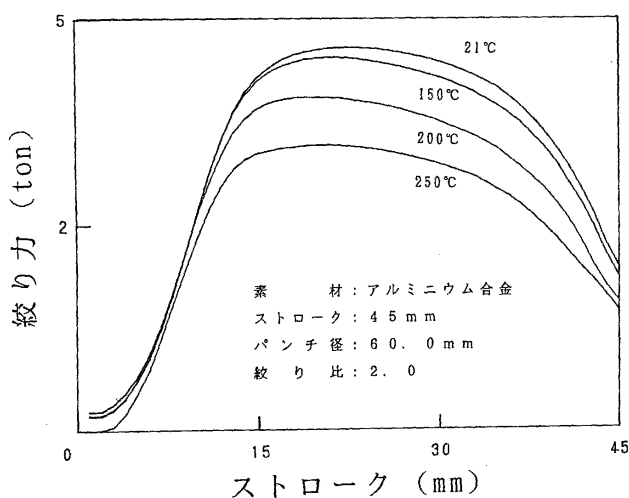


図3 PTFEシートを用いた時の各温度におけるストロークと絞り力の関係

トを潤滑剤に用いた場合を例として図3に示す。絞り力は、始めはストロークが長くなるにつれ急激に増大しその後減少していく。このときの最大絞り力が小さいほど、ポンチ肩での破断を避けることができ成形限界である限界絞り比が向上させられるため、より深い絞り加工が可能となる。本研究では、この最大絞り力を尺度として各種高分子試料の潤滑性能を比較した。高分子シートを潤滑剤として用いた結果を表2に示す。最大絞り力の値は、3回の測定の実測値である。表中の×印は、変形抵抗が大きく加工中に金属板が破断したものであり、△印は高分子シートが融着し絞り加工が不可能であったことを示す。

高分子材料の潤滑機構は、高分子がガラス状態や結晶化状態にある比較的低温領域と分子が流動し得るガラス

No	略号	厚さ(μm)	メーカー	T _g (°C)	T _m (°C)	溶解度パラメータ ⁵⁾ [MPa] ^{1/2}	最大絞り力(ton)					
							21°C	100°C	150°C	200°C	250°C	
英名	JIS7121											
1	PVA	25	クラレ(株)	43	216	36.6	5.21	×	4.94	4.21	△	
	Poly(vinyl alcohol)											
2	EVOH	30	クラレ(株)	62	186	30.6	5.40	×	×	△	△	
	Ethylene vinylalcohol copolymer											
3	PET	12	帝人(株)	77	259	24.3	5.26	×	×	4.50	△	
	Poly(ethylene terephthalate)											
4	PET	25	帝人(株)	77	259	24.3	×	×	×	4.99	△	
	Poly(ethylene terephthalate)											
5	O-PP	20	豊トクヤマ	5	165	16.2	×	4.98	4.79	△	△	
	Oriented polypropylene											
6	C-PP	20	豊トクヤマ	5	165	16.2	5.07	4.99	4.80	△	△	
	Casted polypropylene											
7	O-Ny6	14	ユニチカ(株)	49	225	21.5	5.13	5.24	×	4.96	△	
	Oriented Nylon-6											
8	C-Ny6	14	三菱樹脂(株)	49	220	22.9	4.82	4.76	4.44	4.99	△	
	Casted Nylon-6											
9	PEEK	50	住友(株)	142	343	23.3	×	×	×	×	4.06	
	Poly(ether ether ketone)											
10	PSF	25	住友(株)	188	-	-	×	×	×	×	×	
	Polysulfone											
11	PES	25	住友(株)	188	-	-	×	×	×	×	4.52	
	Poly(ether sulfone)											
12	PEI	25	住友(株)	217	-	23.0	×	×	×	5.04	4.24	
	Poly(ether imide)											
13	PTFE	50	日東電気工業(株)	127	327	13.5	4.64	4.64	4.50	4.04	3.47	
	Polytetrafluoroethylene											
14	Warm forming lubricant	-	-	-	-	-	4.73	4.71	×	×	-	
	ユニコン414K 石原薬品(株)											
15	Mixed lubricating oil	-	-	-	-	-	×	×	×	5.17	-	
	G750/G6360-1:1 日日本工作油(株)											
16	Water soluble lubricant	-	-	-	-	-	×	5.36	5.13	4.41	3.67	
	C2576 日日本工作油(株)											

(注) ×: 破断により絞りできなかった △: 高分子シートの融着により未測定

表2 用いた潤滑剤の物性^{5) 6)}

転移温度 (T_g) や融点 (T_m) 以上と異なるであろう。分子の流動性がないガラス状態での温度領域では、表面自由エネルギーが重要であると考えられる。表面自由エネルギーと関連深い高分子の溶解度パラメーター (分子間凝集エネルギー密度の1/2乗で定義される) と最大絞り力の関係をプロットしたのが図4である。いずれもT_gまたはT_m以下の21°Cにおける結果であり、溶解度パラメーターが大きいほど最大絞り力も大となっている。すなわち、溶解度パラメーターが小さい材料の方が、深絞り加工の潤滑剤として向いていると言える。一方、T_gやT_m以上の高温では分子が流動し得るため軟化溶解した層を介してすべる (軟化溶解型⁷⁾) ことが潤滑性の支配的因子となる。

代表的な4種の汎用高分子PVA, PET, C-PP, PTFEについて絞り加工温度と最大絞り力の関係を図5に表す。このようにいずれの高分子でも概ね加工温度の上昇に伴って最大絞り力は低下し、絞り性の向上が見られた。これは、先に述べたようにT_g以上の高い温度領域における熱可塑性樹脂のすべりの形態は、軟化溶解層が潤滑剤的な役割を果たす「軟化溶解型」となり、金型と素板間において流体潤滑の状態を作り出し、高い潤滑性を示したと考えられる。全温度範囲において最も高い絞り性を示したのはPTFEであった。PTFEは高温時でも流動が起こりにくく、軟化溶解型とは異なったすべり形態をとっていると思われる。PTFEの分子間力は小さく、表面自由エネルギーが非常に小さいことが良好な絞り性を示した一つの要因である。

T_g以上で潤滑性を発現する顕著な例は、高耐熱性高分子であるPEEK (表2 No.9)、PES (表2 No.11)、PEI (表2 No.12) において見られる。一般に耐熱性高分子は、分子の剛

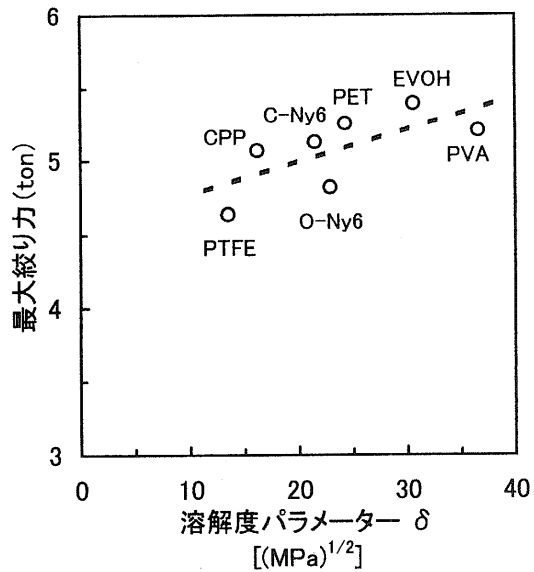


図4 溶解度パラメーターと最大絞り力

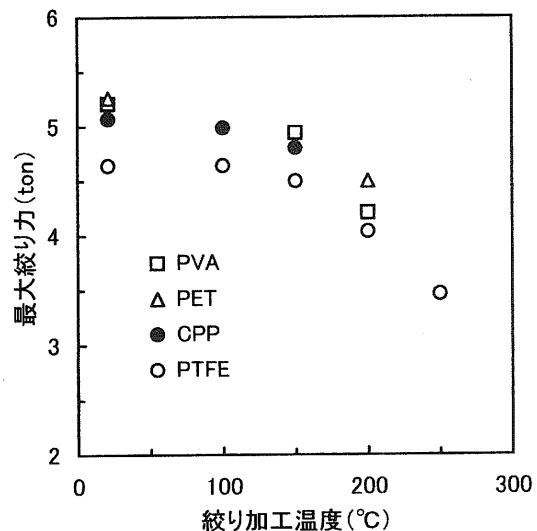


図5 絞り加工温度と最大絞り力

直性を大きくすることによりT_mまたはT_gを高めている。これらの高分子はいずれもT_gが142~217°Cと高く、かつ表面自由エネルギーもPP等に比べ大きいと推測され、加工温度150°Cまでは破断により絞り加工できなかった。しかし、PEEK、PES、PEIはそれらのT_g (T_gやT_mでは分子運動が不連続的に変化する) 以上になると、分子の流動性が増し比較的良好な絞り性を示した。軟化溶解による潤滑性は、シートの厚さによっても異なる。表2の2つのPETに見られるように、薄いもの (12μ、表2 No.3) の方が厚いもの (25μ、表2 No.4) に比べ潤滑性も良好で最大絞り力も小さい値を示した。

上で述べてきたようにT_g以上やT_m付近では分子の流動性が増すため比較的良好な潤滑性を示すが、一方、加工温

度がシートのTm以上になると表2～表4の△で示されるように、シートと金型との融着といった問題が生じる。Tm以上ではほとんどの高分子シートが融着すると考えられるため、加工温度とTmとの関係を考慮する必要がある。

分子のフレキシビリティや流動性の影響は、同じ素材のシートでも分子が配向し結晶化度も高い延伸加工(oriented)された試料と無延伸加工(casted)試料の比較においても見られる。O-PP(表2 No.5)とC-PP(表2 No.6)、O-Ny6(表2 No.7)とC-Ny6(表2 No.8)を比較すると、いずれも低温では延伸に比べ無延伸のシートのほうが最大絞り力は平均的に小さい結果となっている。高分子フィルムは一般に延伸加工による分子の配向により、引張強さが向上し伸びが小さくなる。最大絞り力における延伸・無延伸の差は、この分子配向のため高分子のフレキシビリティや流動性が小さくなっていることに起因していると考えられる。スライスハム等の食品用深絞り包装として無延伸ナイロンシートが適しているのも同様の理由からである⁹⁾。Tm付近では材料の軟化流動の影響が大きく両者間の差は小さいものであった。

市販の高分子シートは印刷性を高めるためにコロナ処理により表面を粗くすることがある。今回使用したC-Ny6は片面のみがコロナ処理してあるため、この処理面を材料側にした場合と、金型側にした場合を比較した結果を表3に示す。コロナ処理により動摩擦係数は大きくなるが、コロナ処理面を金型側とした場合、アルミニウム、ステンレスとも150℃では破断してしまい絞り加工できず、コロナ未処理面すなわち滑り易い方を金型側とする方が絞り性は良好であった(しかし、200℃ではTm近くであるため先に述べたように高分子シートの融着により、コロナ処理・未処理にかかわらず最大絞り力は増加した)。このことは、ダイ側にはポリエチレンフィルムを用いて潤滑状態を良くし、逆にポンチ側は潤滑性を悪くすることによって限界絞り比が向上するという結果⁹⁾と一致する。これらのことは、ポンチ、ダイ側ともに一様に潤滑状態を良くするのではなく、さらにきめ細かな潤滑剤の制御によりさらなる絞り性の向上が図られることを示唆している。

高分子シートを潤滑剤として用いた今回の測定試料中PTFEが全温度範囲に渡って最も最大絞り力が小さく良好な絞り性を示したが、PTFEに次いで良かったのは水溶性潤滑剤G2576(表2 No.16)であった。比較のために行った従来品である414K(表2 No.14)、混合油(表2 No.15)では、

表面形状		アルミニウム合金				
材料側	金型側	21℃	100℃	150℃	200℃	250℃
コロナ処理	未処理	4.82	4.76	4.44	4.99	△
未処理	コロナ処理	-	-	×	4.92	△

主) ×: 破断により絞れなかった △: 高分子シートの融着により未測定

表3 C-Ny6表面におけるコロナ処理の最大深絞り力 (ton) への影響

材料面への塗布量の違いによるデータのバラツキが大きかつ高温では潤滑性に劣り絞り成形できなかった。PTF以外の高分子シートでは、加工温度150℃まではPP、C-Ny6、200℃程度ではPVA(表2 No.1)、PET(表2 No.3) O-Ny6、C-Ny6、また250℃のような高温ではPEEK、PE PESのような高耐熱性高分子シートが比較的良好な絞り性を示した。

3.2 高分子のコーティング加工板による温間絞り加工

高分子をコーティングした試料、なたね油と合成洗剤を塗布した試料およびそれらにシリカゲルとPTFEの粉末を添加したものの結果を表4に示す。PSFのシート状(表2 No.10)のものは結晶性が高く剛直なため変形抵抗が大きくなり250℃まで絞り成形できなかったのに対して、コーティングでは膜厚が0.9μm(表4 No.22)と薄いためか220℃で成形可能であった。PVAのコーティングでは、膜厚1.4μm(表4 No.17)のものでは温度140℃まで絞り成形できなかったが、180℃では成形可能となった。25μm厚(表4 No.18)の方が1.4μmに比べ小さい絞り力を示したが、これは1.4μmのものがコーティング膜厚が薄すぎ、材料と金型との界面でいわゆる潤滑切れの状態となったためと思われる。同じことが先のPSFについても言える。

今回のコーティングは実験室的に行う関係上キャスト法により行ったが、熱融着や化学結合等を利用することによりコーティング材と加工板との密着性を高める工夫が必要である。また、同一の素材でシートとコーティングでは同じ厚さでも材料面側との摩擦が異なるため、前述のコロナ処理面における検討と同様に絞り性も違った結果を示すと思われる。この違いをEVOHでの結果(表4 No.21と表2 No.2)の比較で見ることができ。ほぼ同じ膜厚にもかかわらず、シート状では絞り成形できなかったのに対してコーティングでは成形可能となった。一般に、コーティングの方がシートに比べて加工板材との界面における摩擦を大き

No.	潤滑剤	15℃	100℃	140℃	180℃	220℃
17	PVA (1.4μm)	×	×	×	4.80	△
18	(25μm)	×	×	4.87	4.44	△
19	PVA/PTFE粉末	5.04	4.75	4.75	4.40	△
20	PVA/Silicagel粉末	×	×	×	×	△
21	EVOH (27μm)	×	5.13	4.86	4.31	△
22	PSF (0.9μm)	×	×	×	×	4.93
23	PSF/PTFE粉末	5.01	4.74	4.64	4.32	3.85
24	PSF/Silicagel粉末	×	×	×	×	×
25	なたね油	×	×	5.49	4.83	4.57
26	なたね油/PTFE粉末	×	×	5.18	4.69	4.35
27	合成洗剤	×	5.59	5.47	4.87	4.51
28	合成洗剤/PTFE粉末	5.35	5.10	5.15	4.67	4.33
29	PTFE (50μm)	4.79	4.65	4.57	4.05	3.67

(注) ×: 破断により絞れなかった
△: 高分子シートの融着により未測定

表4 高分子コーティング処理および塗布潤滑剤によるアルミニウム板の円筒深絞り試験における最大絞り力 (10ton)

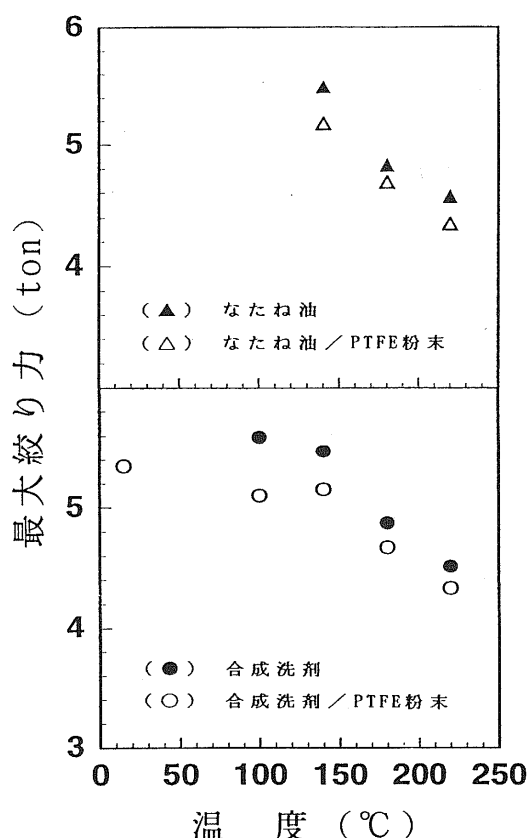


図6 PTFE粉末の添加効果

くしやすいことから良い絞り性を示したと思われる。

表4 No.19とNo.23に示すように、PTFE微粉末をバインダーとしてPVA,PSFを用いアルミニウム板に固着した場合、特に低温域で絞り性の向上が見られ、PTFEの低い表面自由エネルギーの効果を認めた。一方、シリカゲル粉末を用いアルミニウム板へ固着したもの(表4 No.20, 24)は、破断により絞り成形できなかった。

高温用潤滑剤として古くから使用されていたなたね油および水溶性である台所用合成洗剤の両者に、PTFE粉末を添加した場合の効果を表4 (No.25~No.28) および図6に示す。これらの図表に示されるように、この場合も最大絞り力の低下がみられた。また、絞りきずが発生しやすいといった欠点も観察されたが、これは潤滑切れのためと考えられるため、良く言われているように粘度を上げることによる解決等を試みる必要がある。

4. まとめ

温間絞り加工法における潤滑剤への高分子材料の適用性についてアルミニウム板の円筒深絞り試験の結果から次の

ような知見を得た。

- 1) 絞り加工に必要な高い温度領域では、高分子材料の分子の流動性が支配的である。
- 2) 高分子材料のTgまたはTm以下の低い温度では、表面粗さ、表面自由エネルギー、分子の配向性が重要である。
- 3) シート状のものよりコーティングのものの方が膜厚を薄くすることができ、かつ、加工板と高分子との密着性を高めることにより両者間の摩擦係数が大きくとれるため、絞り性の向上につながる。しかし、あまり薄くしすぎると潤滑剤切れに陥る。
- 4) 台所用合成洗剤も比較的良好である。
- 5) PTFE粉末の添加により、比較的低温域で絞り性が向上する。

以上のことを考慮することにより、高分子材料の塑性加工潤滑剤への適用性が期待される。深絞り加工は変形過程が非定常でありこの非定常な過程において、潤滑剤と金型、潤滑剤と材料の界面での摩擦、潤滑剤の表面形状・引張強さ・伸び等、種々の要因が複雑に絡み合った結果として潤滑性を示すため、その機構の考察は繁雑となり分子レベルでの解析は大変困難である。しかしながら、上記の結論は定性的なものではあるが最も基本的なものであると考えられる。

謝辞 本研究の一部は財団法人天田金属加工機械技術振興財団の研究助成を受けてなされたことを付記し、深く謝意を表します。本テーマのきっかけを与えて下さり、温間絞り試験の御指導・御協力を戴きました、新潟県工業技術総合研究所機械電子研究室金属科渡部豊臣(現財団法人信濃川テクノポリス開発機構)、山崎栄一両氏、また高分子試料を提供して戴いた各社に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 渡部豊臣, 塑性と加工, 33(375), 396 (1992).
- 2) 紫竹耕司, 山崎 淳, 渡部豊臣, 小倉健一, 平成3年度塑性加工春季講演会, 239 (1991).
- 3) 山崎 淳, 塑性と加工, 33(375), 404 (1992).
- 4) 宮 正光, 塩見友雄, 渡部豊臣, 山崎栄一, 第43回高分子討論会, 43(9), 3268 (1994).
- 5) プラスチックフィルム・材料総覧'89, 加工技術研究会.
- 6) 住友ベークライト(株) スミライトカタログ (1990).
- 7) 高分子トライポマテリアル, 渡辺 真, 笠原又一, 関口 勇, 広中清一郎, 12, 共立出版 (1990).
- 8) 久野友之, ジャパンフードサイエンス, p.60, 1979-4.
- 9) 加藤健之, 内田恭彦, 塑性と加工, 7(70), 576 (1966).