

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

長岡技術科学大学 工学部 化学系

教授 塩見友雄

(平成4年度研究開発助成 AF-92015)

1. 研究の背景

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、破断しやすいパ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もないため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1、2に²⁾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と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り今後の重要なテーマである^{2),3)}。

そこで、成形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地球環境の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. 実験条件および方法

2.1 試料

使用した高分子系潤滑剤は、表1^{4),5)}に示した高分子シートならびに市販の温間絞り加工用潤滑剤ユニコン414K(石原薬品(株))と油性潤滑剤G750とG6360(株)日本工作油)を1:1で混合したもの、および新しく(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である。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1700、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、

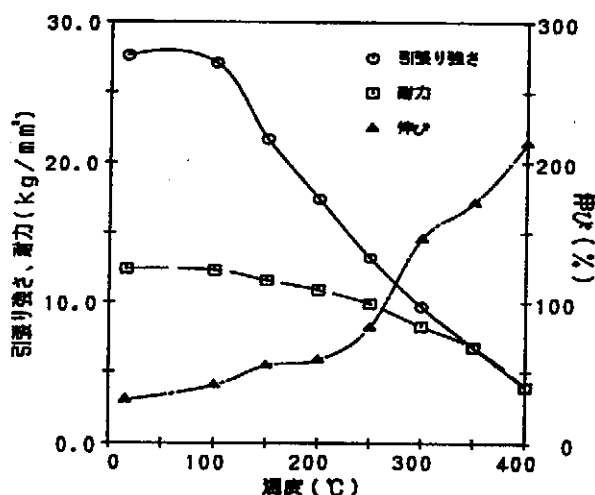


図1 アルミニウム合金の引張り試験結果²⁾

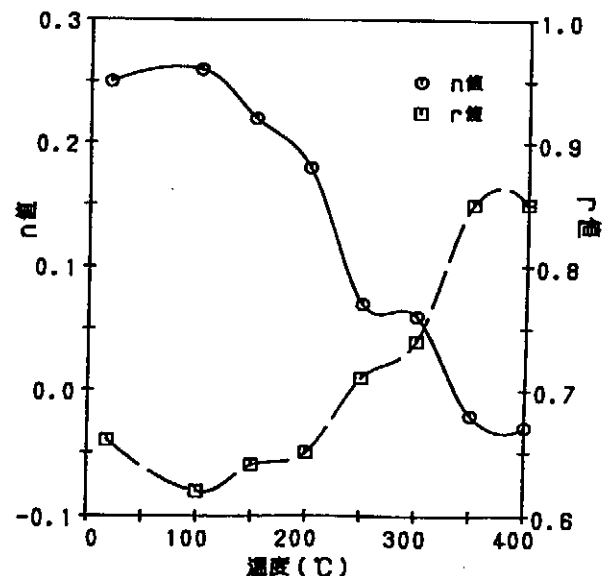


図2 アルミニウム合金のr値およびn値²⁾

表1 用いた高分子材料の物性^{4),5)}

No	略号 厚さ(μm) メーカー 英号	分子構造	Tg	Tm	連続 使用 温度	引張強さ (Kg/mm ²) MD/TD		伸び (%) MD/TD		臨界面 張力γ _c (dyn/cm)
			(°C)	(°C)		ASTM D-882		ASTM D-882		
			JIS K7121 10°C/min	UL 規格	ASTM D-882 20°C65%RH	ASTM D-882 20°C65%RH	Zisman			
11	PVA 25 クラレ㈱ Poly (vinyl alcohol)	$\left(\text{CH}_2 - \underset{\text{OH}}{\text{CH}} \right)_n$	43	216		17 19	70 60	37		
2	EVOH 30 クラレ㈱ Ethylene vinylalcohol copolymer	$\left(\text{CH}_2 - \underset{\text{OH}}{\text{CH}} \right)_n \left(\text{CH}_2 - \text{CH}_2 \right)_m$	62	186		9 4	180 140			
3	PET 12 帝人㈱ Poly (ethylene terephthalate)	$\left(\text{C} \begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{C} \end{array} - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{C} \begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{C} \end{array} - \text{O} \left(\text{CH}_2 \right)_2 - \text{O} \right)_n$	77	259	200	16 19	140 60			
4	PET 25 帝人㈱ Poly (ethylene terephthalate)	$\left(\text{C} \begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{C} \end{array} - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{C} \begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{C} \end{array} - \text{O} \left(\text{CH}_2 \right)_2 - \text{O} \right)_n$	77	259	200	16 19	140 60	43		
5	OPP 20 徳山曹達㈱ Oriented polypropylene	$\left(\text{CH}_2 - \underset{\text{CH}_3}{\text{CH}} \right)_n$	5	165	120	13 25	140 50			
6	CPP 20 徳山曹達㈱ Casted polypropylene	$\left(\text{CH}_2 - \underset{\text{CH}_3}{\text{CH}} \right)_n$	5	165	120	5 4	730 730			
7	O-Ny6 14 コニチカ㈱ Oriented Nylon-6	$\left(\text{N} \begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{C} \end{array} \left(\text{CH}_2 \right)_5 - \text{C} \begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{C} \end{array} \right)_n$	49	225	180	20 22	90 90	42		
8	C-Ny6 14 三菱樹脂㈱ Casted Nylon-6	$\left(\text{N} \begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{C} \end{array} \left(\text{CH}_2 \right)_5 - \text{C} \begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{C} \end{array} \right)_n$	49	220	180	6 6	300 300			
9	PEEK 50 住友ベーク ライト㈱ Poly (ether ether ketone)	$\left(\text{O} - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{O} - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{C} \begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{C} \end{array} - \text{C}_6\text{H}_4 \right)_n$	142	343	240	9.2 8.6	164 179			
10	PSF 25 住友ベーク ライト㈱ Polysulfone	$\left(\text{O} - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{C} \begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{C} \\ \\ \text{CH}_3 \end{array} - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{O} - \text{S} \begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{O} \end{array} - \text{C}_6\text{H}_4 \right)_n$	188	-	150	7.4 6.9	140 120			
11	PES 25 住友ベーク ライト㈱ Poly (ether sulfone)	$\left(\text{O} - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{S} \begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{O} \end{array} - \text{C}_6\text{H}_4 \right)_n$	188	-	180	8.5 8.4	71 64			
12	PEI 25 住友ベーク ライト㈱ Poly (ether imide)	$\left(\text{N} \begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{C} \end{array} - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{O} - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{N} \begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{C} \end{array} - \text{C}_6\text{H}_4 \right)_n$	217	-	170	10.9 10.0	76 62			
13	PTFE 50 日東 電気工業㈱ Polytetrafluoroethylene	$\left(\text{CF}_2 - \text{CF}_2 \right)_n$	-113, 127	327		2 2	200 200	18.5		

(注) Tg:ガラス転移温度, Tm:融解ピーク温度, MD:縦方向(Machine Direction), TD:横方向(Transverse Direction)

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。また、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処理したものについても温間絞り加工を行った。なお、PVA水溶液へのPTFE粉末の添加は懸濁困難のため、少量のメチルアルコールにPTFEを懸濁させておきこれを加えた。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)）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3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を用いた。表2に示した金型条件および成形条件により、アルミニウムおよびステンレス合金板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い求まる最大絞り力によって潤滑性能を評価した。

3.結果と考察

3.1 高分子シートによる温間絞り加工

プレス加工では、摩擦を小さくしなくてはならないところと反対に摩擦を利用するところがある。加工される材料と金型間に生ずる摩擦力をできるだけ小さくし、破断による絞り限界の低下を抑えることを目的に潤滑剤が使用されている。潤滑剤として高分子シートを用いて円筒深絞り試験を行った結果を表3にまとめて示した。各々3回測定を行った最大絞り力の平均値である。

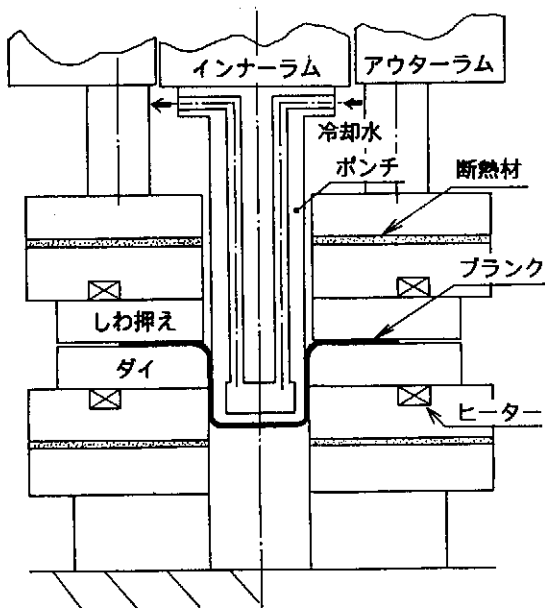
PTFE（表3 No.13）の成形温度と絞り力の関係について図4に示す。絞り比を一定とすると成形温度が上昇するに従って絞り力は小さくなり、またピークも低ストローク側にシフトしている。これは、図1、2に示したようにフランジ面の温度が上昇することによりこの部位での変形抵抗が低下することによる結果と考えられる。最大絞り力が小さいほど材料と金型との界面における変形抵抗が小さく、パンチ肩での破断危険を避けることができるため成形限界である限界絞り比を向上させることができる。

表3において×印は、加工中に金属材料が破断したことを示すが、これは変形抵抗が大きく材料がちぎれたものであ

表2 金型条件および成形条件

項目	成形条件
金型 材質 パンチ外径	SKD11 Ti:コート 60mm
加工板材	①アルミニウム合金 A5182S (板厚1.0mm 120mm φ) ②ステンレス合金 SUS304 (板厚1.0mm 120mm φ)
成形温度 パンチ	20~250℃ 0℃ (但し、ダイ、しわ押えが室温の場合はパンチも室温)
絞り比	2.0 (プランク径120mm φ)
深さ	45mm
加工スピード	3.3mm/S
しわ押え力	アルミニウム合金 : 1.0 ton ステンレス合金 : 3.0 ton

る。本絞り加工法における高分子シート潤滑剤の適用性は、ひとえにシートと金型との潤滑性が問題となる。その潤滑性は、単にシート表面と金属との間の摩擦係数が小さいことのみならず、表1と表3とを対応させて考えるとシート構成高分子のフレキシビリティや流動性によって支配されると思われる。事実、おおむね加工温度の上昇と共に最大絞り力は低下し、また低温で破断したものでも高温においては絞り加工が可能となっている。これは温度の上昇とともに高分子のフレキシビリティや流動性も大きくなり（ガラス転移温度や融点では分子運動が不連続的に変化する）、結果として潤滑性が増大したと考えられる。このことは、高耐熱性高分子であるPEEK（表3 No.9）、PSF（表3 No.10）、PES（表3 No.11）、PEI（表3 No.12）において顕著に見られる。一般に耐熱性高分子は、分子の剛直性を大きくすることにより融点（Tm）を高めており、前記の高分子はいずれも融点またはガラス転移温度（Tg）が142~217℃と高いため、加工温度150℃までは破断により絞り加工できなかった。しかし、PEEK、PES、PEIはそれらの融点またはガラス転移温度付近になると、分子の流動性が増し比較的良好的な絞り性を示した。また、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。OPP（表3 No.5）とCPP（表3 No.6）、O-Ny6（表3 No.7）とC-Ny6（表3 No.8）を比較すると、いずれも低温では延伸に比べ無



ポンチ：φ60 (S45C) ポンチ肩半径：R3
 ダイ、しわ押えの材質：SKD11 (TiN coating)
 ダイ肩半径 : R6

図3 金型構成図

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。これは、一般に延伸加工することにより分子が配向し、引張強さが向上し伸びが小さくなる傾向がみられるが、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

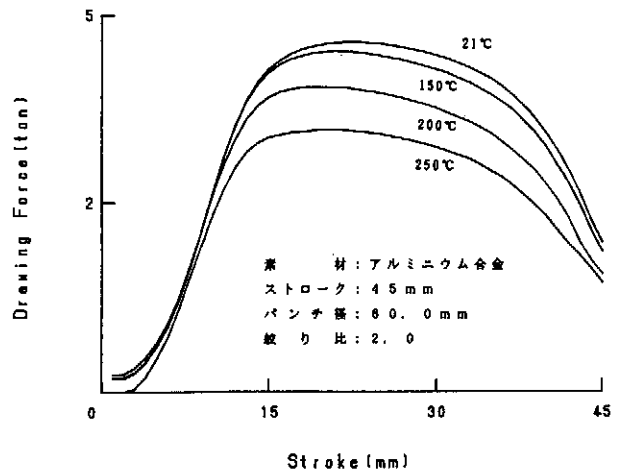


図4 PTFEシートを用いた時の各温度における絞り力

イロンシートが適しているのも同様の理由からであり⁶⁾、この知見は本プレス加工における温間絞り法での高分子潤滑剤の選定において重要な指針を与える。融点付近では摩擦面での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。

一方、加工温度がシートの融点以上になるとシートと金型との融着といった問題がでてくる。今回の実験では融着しそうになった加工温度での測定は中止したがこれを表3で△印によって表示した。融点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、加工温度と融点との関係を考慮して高分子シートを選定する必要がある。

表3 高分子シートおよび潤滑油を用いた円筒深絞り試験における最大絞り力 (ton)

No	潤滑剤	厚さ μm	アルミニウム合金					ステンレス合金				
			21°C	100°C	150°C	200°C	250°C	21°C	100°C	150°C	200°C	250°C
1	PVA	25	5.21	×	4.94	4.21	△	14.40	9.60	8.99	8.13	△
2	EVOH	30	5.40	×	×	△	△	14.99	10.48	9.79	7.89	△
3	PET	12	5.26	×	×	4.50	△	—	—	—	8.19	△
4	PET	25	×	×	×	4.99	△	14.10	—	—	8.30	△
5	OPP	20	×	4.98	4.79	△	△	14.98	10.29	8.80	△	△
6	CPP	20	5.07	4.99	4.80	△	△	13.25	10.29	8.58	△	△
7	O-Ny6	14	5.13	5.24	×	4.96	△	13.41	11.00	9.30	8.43	△
8	C-Ny6	14	4.82	4.76	4.44	4.99	△	13.77	9.53	8.75	8.22	△
9	PEEK	50	×	×	×	×	4.06	×	×	10.79	8.53	8.65
10	PSF	25	×	×	×	×	×	×	—	12.10	9.48	9.16
11	PES	25	×	×	×	×	4.52	—	—	—	10.80	10.30
12	PEI	25	×	×	×	5.04	4.24	—	—	—	9.64	9.64
13	PTFE	50	4.64	4.64	4.50	4.04	3.47	11.98	9.32	8.53	8.04	7.59
14	414K	—	4.73	4.71	×	×	—	13.17	10.14	×	×	×
15	混合油	—	×	×	×	5.17	—	14.46	11.11	10.51	10.07	×
16	G2576	—	×	5.36	5.13	4.41	3.67	13.82	11.01	9.55	9.39	8.61

(注) ×：破断により絞れなかった △：フィルムの融着により未測定 —：未測定

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するか、金型側にするかを検討した結果を表4に示した。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℃では融点近くであるため同様の最大絞り力を示した。また、パンチ、ダイス側ともに一様に潤滑状態を良くするのではなく、ダイス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、逆にパンチ側は潤滑性を悪くすることによって限界絞り比の向上が確認されている⁷⁾が、このことは今回の結果と併せさらにきめ細かな潤滑状態の制御によりさらなる成形性の向上が図られることを示唆している。シート厚さの影響をPETシートで厚さ12μ、25μを使用し比較した。薄いもの(12μ、表3No.3)の方が厚いもの(25μ、表3No.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。

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。この良好性は、

PTFEの融点が高くてもシート表面の自由エネルギーが非常に小さいことによると考えられる。水溶性潤滑剤G2576(表3No.16)もPTFEに次いで絞り性が良かった。比較のために行った従来品である414K(表3No.14)、混合油(表3No.15)では、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。PTFE以外的高分子シートでは、加工温度150℃まではPP、C-Ny6、200℃程度ではPVA(表3No.1)、PET(表3No.3)、O-Ny6、C-Ny6、また250℃のような高温ではPEEK、PEI、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。

ステンレス合金での結果は、これまでの報告¹⁾と同様最大絞り力はアルミニウム合金の2倍強を示したが、これはステンレスとアルミニウムの延展性の違いによるものである。また、温度の上昇と共に最大絞り力は小さい値を示す、シート厚は薄いものの方が良好、シートの種類による最大絞り力、いずれもアルミニウム合金の場合と同様の傾向を示し著しい特異性は認められなかった。

3.2 潤滑処理板による温間絞り加工

実験2.2の方法により高分子をコーティングした潤滑処理アルミニウム板および比較のためPTFEシート、なたね

表4 C-Ny6表面におけるコロナ処理の最大絞り力 (ton) への影響

表面形状		アルミニウム合金					ステンレス合金				
材料側	金属側	21℃	100℃	150℃	200℃	250℃	21℃	100℃	150℃	200℃	250℃
コロナ処理	未処理	4.82	4.76	4.44	4.99	△	13.77	9.53	8.75	8.22	△
未処理	コロナ処理	-	-	×	4.92	△	-	-	×	-	△

(注) ×: 破断により絞れなかった △: フィルムの融着により未測定 -: 未測定

表5 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合金板の円筒深絞り試験における最大絞り力 (ton)

No	潤滑剤	15℃	100℃	140℃	180℃	220℃
1	PVA(1.4μm)	×	×	×	4.80	△
2	(25μm)	×	×	4.87	4.44	△
3	PVA/PTFE粉末	5.04	4.75	4.75	4.40	△
4	PVA/Silicagel粉末	×	×	×	×	△
5	EVOH(27μm)	×	5.13	4.86	4.31	△
6	PSF(0.9μm)	×	×	×	×	4.93
7	PSF/PTFE粉末	5.01	4.74	4.64	4.32	3.85
8	PSF/Silicagel粉末	×	×	×	×	×
9	なたね油	×	×	5.49	4.83	4.57
10	なたね油/PTFE粉末	×	×	5.18	4.69	4.35
11	合成洗剤	×	5.59	5.47	4.87	4.51
12	合成洗剤/PTFE粉末	5.35	5.10	5.15	4.67	4.33
13	PTFE(50μm)	4.79	4.65	4.57	4.05	3.67

(注) ×: 破断により絞れなかった △: 融着のため未測定

油、合成洗剤、また各々にPTFE粉末を添加したものを潤滑剤に使用し、円筒深絞り試験を行った結果を表5に示す。PSFのシート状(表3 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0.9 μm(表5 No.6)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1.4 μm(表5 No.1)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。25 μm厚(表5 No.2)の方が1.4 μmに比べ小さい絞り力を示したが、これは1.4 μmのものがコーティング厚さが薄すぎ、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。また、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、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この違いをEVOHでの結果、表5のNo.5と表3のNo.2の比較で行うことができる。実験条件が異なるため正確な比較ではないが、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り加熱温度が高いほど絞り力は小さい値を示した。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くしやすいため良い絞り性を示すと思われる。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の結果が表5のNo.3とNo.7であるが、バインダーの差は認められないものの最大絞り力は小さくPTFEシートでのその値に近い値を示し、PTFEの低い表面自由エネルギーの効果を認めた。一方、Silicagel粉末を用いアルミニウム板へ固着したもの(表5 No.4、8)は、破断により絞り成形できなかった。潤滑剤に高温用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を用い、両者にPTFE粉末を添加した場合の効果を表5(No.9~No.12)および図5に示した。これらの図表に示されるように、PTFE粉末をわずか1(w/v)%添加しただけで最大絞り力の低減がみられた。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

以上の結果から、本温間絞り加工用潤滑剤としての高分子シートの適用性は、金型に対する表面摩擦係数が小さいこと、高分子のフレキシビリティや流動性が大きいこと、のどちらかの条件を満足することが必要であると考えられる。

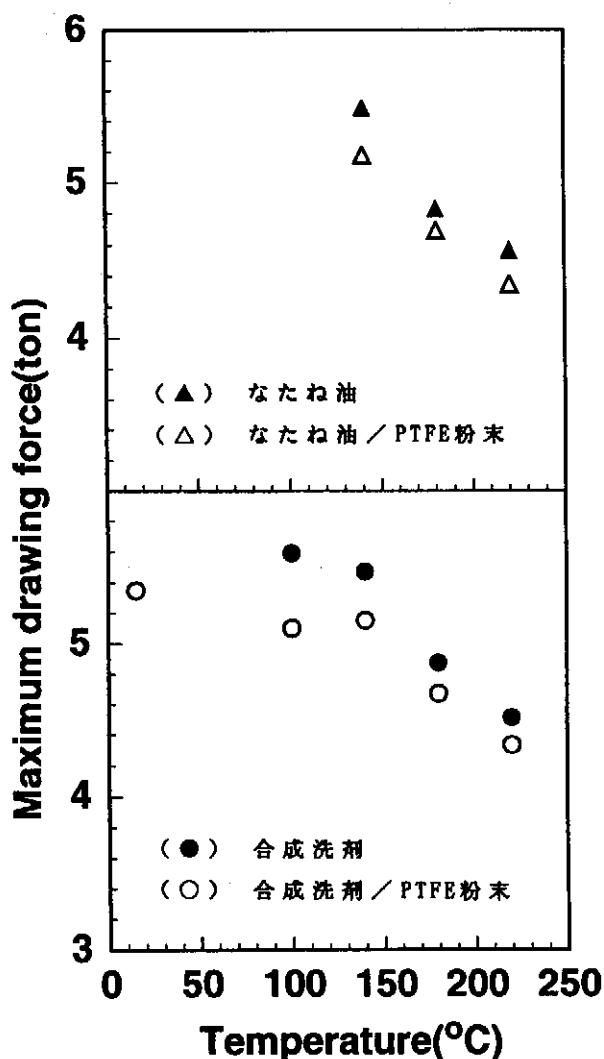


図5 PTFE粉末の添加効果

また、シート状のものよりコーティングのものの方が膜厚を格段に薄くすることができ、かつ、加工板との密着性を高めることにより加工板と高分子との摩擦係数を大きくとれるため、絞り性の向上につながると考えられる。一方、台所用合成洗剤を潤滑剤として使用したところ比較的良好な結果を得た。また、PTFE粉末の添加により潤滑性の向上が認められ水溶性潤滑剤への適用が期待される。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、その機構の考察は複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。

付 記

本研究の遂行に当たり研究助成金を頂いた財団法人天田金属加工機械技術振興財団および高分子試料を提供して頂

いた各社に感謝致します。また、実験遂行において山崎栄一氏（新潟県工業技術センター）に多大な御協力を頂いた。

共同研究者：

渡部 豈臣（新潟県工業技術センター機械電子研究室金属科）

宮 正光（長岡技術科学大学工学部化学系）

文 献

- 1) 渡部豈臣、塑性と加工、33(375)、396(1992).
- 2) 紫竹耕司、山崎 淳、渡部豈臣、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) プラスチックフィルム・材料総覧'89、加工技術研究会.
- 5) 住友ベークライト(株)スミライトカタログ(1990).
- 6) 久野友之、ジャパNFフードサイエンス、p.60、1979-4.
- 7) 加藤健之、内田恭彦、塑性と加工、7(70)、576 (1966).