

© 1984 ISIJ

## エンジニアリングプラスチックの現状と課題



牧

廣\*

## Recent Trends in Engineering Plastics

Hiroshi MAKI

## 1. はじめに

昭和 53 年実績について通産省が実施した調査<sup>1)</sup>によれば、表 1 に示したように 742 種類の部品のうち 242 種類 (32.6%) が鉄から、また同数が非鉄金属からエンジニアリングプラスチック (以下エンプラと略す) に代替された。また代替理由で最も多かつたのは、成形加工組立費及び原材料費の低減、すなわち経済性であつた。

最近のエンプラの発展は、極めて目覚ましい。しかしこの状態に達するまでに、ほぼ 1/4 世紀に及ぶ開発努力があつた。

## 2. セルロイドからエンプラまで

鉄、石、木材など有史以来の歴史をもつ材料に比べてプラスチックはほぼ 100 年程度の歴史しかない若い材料である。

南北戦争終結後大流行した球突きによつて払底した象牙の代替材料を求める懸賞金を獲得したのは、印刷工であつた HYATT 兄弟であつたという。彼らはニトロセルロース (綿火薬) に樟脳を配合した材料を発明した。1868 年であつた。セルロイドと命名されたこの材料が始めてのプラスチックであつた。また完全に合成化合物からなり、しかも実用性をもつフェノール樹脂が、BAEKLAND によつて 1907 年に発明された。これが最初の合成樹脂である。以来いろいろな経緯を経ていくつかの節目がみられる。すなわち第 1 次世界大戦、世界大恐慌及び第 2 次大戦であり、また後述のように 1960 年がもう 1 つの節目のように見える。

フェノール樹脂は接着剤、塗料として細々と実用されたようであり、プラスチックとしてはおそらく絶縁材料として開発努力が続けられたと思われる。1914 年に始まつた第 1 次大戦によつて、軍用機のは布用塗料としてアセテートドープ (ラッカー) が実用化した。戦後自動車と飛行機が発展し、貼合わせ方式の安全ガラスのニーズがおこり、接着用中間膜が開発された。1929 年に始

まつた大恐慌は極めて潰滅的であつた。これからの必死の脱出努力がいろいろとなされ、特にぼう大な研究投資がガラス繊維 (GF) の開発に投入された。これらの努力の 1 つが後にプラスチック製日用品としてみつけた。1930 年代にはネオプレン (合成ゴム)、ナイロン、有機ガラス (ポリメチルメタクリレート)、ポリエチレンなど重要な発明、工業化がなされたが、1939 年に第 2 次大戦が始まつた。大戦中に画期的な発明がいくつかなされた。代表例を挙げると、不飽和ポリエステルが発明され、前述の GF と共に最初の FRP (Fiber Reinforced Plastics, 繊維強化プラスチック) が開発され、プラスチックに構造材料としての分野をひらいた。その他のものとしてけい素樹脂 (シリコーン) と原爆開発に関連してふつ素樹脂が挙げられ、また接着剤としてのエポキシ樹脂がある。戦後さまざまな合成樹脂が開発されたが、わが国では 1957 年に石油化学工業が稼動し、多量生産、多量消費時代に入り、日用雑貨品と共に包装材料分野が飛躍的に拡大した。そして 1960 年を迎えたのである。

前述の FRP は、長繊維あるいは連続繊維を熱硬化性プラスチックと複合した材料で、引張強さに特徴があるが、生産性が劣る。繊維を熱可塑性プラスチックと複合した FRTP (Fiber Reinforced Thermoplastics) は、射出成形法が適用できるため、生産性は飛躍的に向上するが、成形中に繊維が破碎され、例えば 0.2 mm をピークとする広い繊維長分布をもつようになり、引張強さは低くなる。

最初の FRTP は 1956 年に Fiberfil 社が市販したが、高度の加工技術を必要とした。Du Pont 社はポリアセタール (POM) を 1956 年に発表、1960 年から生産を開始した。また、Bayer 社はポリカーボネート (PC) の生産を 1959 年から開始した。すなわち 1960 年がエンプラの誕生といえる。

ナイロン (PA)、POM、PC などは、プラスチックとしては高性能であるが、高価なため汎用化は無理であり、したがって砲金 (青銅)、亜鉛合金など非鉄金属製の非耐力機械部品類に開発目標を集約せざるをえなかつ

昭和 59 年 3 月 6 日受付 (Received Mar. 6, 1984) (依頼解説)

\* 工業技術院製品科学研究所 工博 (Industrial Products Research Institute, Agency of Industrial Science and Technology, 1-1-4 Higashi Yatabe-cho Tsukuba-gun Ibaraki pref. 305)

表 1 部分材料をエンプラに代替した理由

機 種	部 品・用 品	採択, 代替の理由 (件数)											代替対象材料						備 考							
		原材料費の低減	成形加工組立費の低減	デザインの自由度	軽量化	難燃性	美観	力学的特性	摩擦・摩耗特性	耐久性	熱的特性	耐薬品性・耐食性	電気的特性	その他の品質向上	その他	鉄	非鉄金属	磁器・ガラス		汎用プラスチック	他種エンジニアリングプラスチック	その他	不明			
自動車	軽乗用車	12種	2	2																						
	小形以上乗用車	61種	8	36																						
(小計)	トラック	34種	14	11	2																					
	バス	6種	1	3	1																					
	2輪自動車	12種	1	3	1																					
		125種	26	55	4	65																				
鉄道車両	貨車	3種			1																					
	機関車	8種	2			1																				
自転車	電車・客車	15種	3	3																						
	スノーモービル	13種	1	7	4																					
(小計)		6種	1	1	4																					
		45種	7	11	9	19	6	4	6	8	2	2	3	3	22	6	2	3								
電気機械	回転電気機器	15種	10	4		5																				
	配線照明機器	5種	3	3																						
(小計)	家庭電気機器	95種	36	23	23	2	5	11	4	7	19	5	5	9	2	2	3	4	7	21	5	3				
	静止電気機器	21種	6	3	1	3		3	2	1	9	2	2	2	2	2	4	9	7	2	3	3				
		136種	52	33	24	10	5	14	10	9	20	11	7	9	2	3	9	32	7	11						
電子機械	民生用電子機械	43種	10	19	3	7	5	2	12	2	6	1	5	3												
	産業用電子機械	38種	10	13	1	22	4	1	9	4	1	6	5	3	1	5	9	13	1	11	6	5	1			
(小計)	電子部品	4種	4	2		2																				
		85種	24	34	4	31	9	3	24	4	3	7	5	8	1	29	21	1	20	13	1					
一般機械	農業機械	42種	23	28	1	28																				
	建設機械	3種																								
(小計)	繊維機械	19種	3	7	2	2																				
	事務機械	23種	14	19		5																				
	ミシン・編機	25種	14	20		16																				
	自動販売機	11種	7	2	2	1																				
		123種	61	76	5	52																				
精密機械	写真機	69種	34	45	42	49																				
	写真機部品	41種	23	31	23	29																				
(小計)	計量器	28種	7	11		3																				
	工業用計器	11種	11	11		11																				
	航空計器	5種	5	5		5																				
	時計	18種	15	16		1																				
		172種	95	119	65	82	16																			
その他	暖房機器	56種	6	6	3	3	13	7	16	5	12	12	9	5	1	8	1	2								45
総 計		742種	271	334	114	262	49	26	96	70	68	56	36	41	62	3	11	242	15	108	24	45	66			

た。当初 Fortune 誌が POM のキャッチフレーズとして用いたエンプラという名称が、非常に魅力的であつたため、PA、POM、PC 及びその後開発された高性能樹脂、あるいはけい素樹脂やふつ素樹脂までも包含したファミリー名となつてしまつた。

### 3. エンプラとは

力学性能、耐温度性能、寸法性能(精度と安定性)など、構造や部品類に使用するに当たつての、材料としての共通的、基盤的性能が優れていることを高性能といひ、生体適合性、選択吸着・透過性、物質識別機能、導電性、圧電性、焦電性その他、その性能を主体とする特

殊用途的な性能をもつこと、あるいは優れていることを高機能ということにするならば、エンプラは基本的には高性能プラスチックである。

1960年代におけるエンプラの概念は、1) 高価であつて汎用化は無理である、2) 高性能である、3) したがつて機械部品を中心とする、いわゆるエンジニアリング用途を開発主対象とせざるをえない、4) 小形の部品、ということであつた。

その後いろいろな面での開発努力がなされ、状況は大きく変化した。筆者の見方によれば、エンプラとは、プラスチックという形態によつて、自動車、電機、電子機械、精密機械その他の分野における先端技術革新を支

え、貢献し、推進する材料という側面を強く主張する合成樹脂（合成樹脂はプラスチックの主原料）ということであるが、一般に次の概念が混在している。すなわち  
 1) 高性能合成樹脂で、advanced あるいは exotic な熱可塑性樹脂が中心、  
 2) 高性能プラスチックであるが、FRTP のような複合化によつて高性能化した汎用プラスチックが包含される、  
 3) 匡体（ハウジング）など大形製品がつくられるようになった、ということである。なお例えば磁性の付与（プラスチックマグネット）や導電性の付与（主として電磁波障害防止策）などのように高機能化が行われている反面、例えばしようびんのように汎用化も行われている。

表 2 各種材料の引張特性

材 料	引張強さ kgf/mm <sup>2</sup>	縦弾性率× 10 <sup>3</sup> kgf/mm <sup>2</sup>
非鉄金属 (Al, Cu, Zn 系)	7~30	7~11
汎用プラスチック	3~8	0.1~0.4
エンブラ (非強化)	5~8	0.2~0.3
GF RTP (PE を除く)	4~19	0.3~1.4
CF RTP	15~19	1.3~1.6
熱硬化性 FRP		
GF RP (MIL の 1~5 級)	6.3~25	0.6~1.5
同、一方向強化材 (GF : 80.5 wt%)	136	6.1
CF RP (高強度 CF), 等方性	59	4.6
同、一方向強化材	157	14
CF RP (高弾性率 CF), 等方性	35	7.4
同、一方向強化材	115	20.3

表 3 軽構造メリット

部 材	負荷方式	破壊のクリテリア	軽構造メリット
棒	引張り	破断	$S/d$
"	"	のび	$E/d$
"	曲げ	破断	$\sqrt{S}/d$
"	"	たわみ	$\sqrt{E}/d$
"	圧縮	座屈	$\sqrt{E}/d$
平板	"	"	$\sqrt{E}/d$
円筒	"	"	$\sqrt{E}/d$
"	曲げ	"	$\sqrt{E}/d$
"	ねじり	"	$E^{2/5}/d$

S : 引張強さ, E : 引張弾性率, d : 比重

量的な分類も行われている。例えば数年前には PA, POM 及び PC を 3 大エンブラといっていたが、これに変性ポリフェニレンオキッド (PPO) とポリブチレンテレフタレート (PBTP) を加えて、5 大エンブラと称している。

以上から容易に理解されるように、エンブラという言葉は、極めて感覚的で曖昧な表現である。その概念は時代によつて変化するし、また人によつて理解が異なる場合もある。

例えば、硬質のポリ塩化ビニル (PVC) は、上水用の鋼管を代替し、さらに下水その他の管に広く使われているし、最古の樹脂であるフェノール樹脂はソケットその他広範な電気部品に、あるいはギヤなどにも使われていた。またエポキシ樹脂製のプラスチックツールなど、多くのエンジニアリング用途の実例がある。これらはいずれもエンブラよりはるか以前に開発されたもので、筆者はこれらもエンブラに包含されるべきものと考えているが、一般には除外されている。

ただ PVC などは、周知のように、エンジニアリング分野以外の広範な用途をもち、非常に汎用性が高かつたために、エンブラとしての power を形成しなかつたといえる。これに対していわゆるエンブラは、開発目標がほぼ集約されていたことと、多種類の「品揃え」がなされて、しかも 1 つの名称のもとにファミリーを形成し、したがって power を形成したといえることができる。

#### 4. エンブラの性能

まずエンブラはプラスチックであり、プラスチック以外の何者でもない。すなわちプラスチックの多くの欠点とともに、例えば摺動特性などいろいろの長所をもっている。

表 2 に各種材料の引張特性を示した。ガラス繊維 (GF) 及び炭素繊維 (CF) で強化した FRTP, すなわち GF RTP, CF RTP を、非強化エンブラと分離して示したが、エンブラは、この 3 者を包含したものであり、

表 4 材料の軽構造メリット

	$S/d$	$\sqrt{S}/d$	$E/d$ ( $\times 10^3$ )	$\sqrt{E}/d$	$\sqrt[3]{E}/d$	$E^{2/5}/d$
鉄 鋼	1.4~6.5	0.4~0.9	1.6~2.8	15~19	3.1~3.6	5.9~7
Ti	10	1.5	2.3	23	4.9	9
Ta	1.9	0.3	1.1	8	1.6	3.1
Al, Cu, Zn 系非鉄金属	1.6~12	0.5~2.1	1.1~2.7	11~32	2.4~7.2	4.3~13
エンブラ	4.1~7	1.8~2.5	0.2	12~14	4.8~5.7	6.8~8.2
GF RTP	3.8~14	1.7~3.3	0.3~1.0	14~27	5.1~8.2	7.7~13
CF RTP	11~15	2.7~3.4	1.0~1.2	26~31	7.7~9.2	13~15
GF RP	4.5~14	1.8~2.9	0.4~0.9	17~22	6	9~11
同、一方向強化材	65	5.6	2.9	37	8.7	16
CF RP* (等方性)	22~38	4~5	3~4.5	44~53	11~12	19~22
同、一方向強化材	71~100	7~8	9~13	76~87	16~17	29~32

\* 高強度 CF 及び高弾性率 CF による CFRP

表 5 エンプラ供給業における昭和 53 年の用途別出荷量調査結果

用 途	ポリアミド (PA)*1			ポリアセタール (POM)			ポリカーボネート (PC)			ポリエチレンテレフタレート (PETP)	
	強 化	非強化	計	強 化	非強化	計	強 化	非強化	計	強化および非強化	
成 形 品	自動車機械	2 173	8 080	10 253	646	8 694	9 340	83	1 259	1 342	400
	その他輸送機械	47	731	778	0	200	200	25	193	218	50
品	電動機	1 572	3 407	4 979	250	3 710	3 960	1 091	4 567	5 658	1 200
	電子機械	628	2 453	3 081	340	8 440	8 780	905	3 459	4 364	900
	精密機械	529	1 630	2 159	100	2 590	2 690	158	1 326	1 484	230
	その他	34	215	249	0	1 150	1 150	489	1 242	1 731	70
	小計	24	632	656	0	550	550	186	960	1 146	0
	計	5 007	17 148	22 155	1 336	25 334	26 670	2 937	13 006	15 943	2 850
	容器・日用品	112	3 247	3 359	0	4 050	4 050	173	1 293	1 466	6 878
	建築資材	0	3 771	3 771	0	1 220	1 220	20	403	423	0
	土木・農水産畜産資材	0	754	754	0	0	0	0	35	35	0
	合計	5 119	24 920	30 039	1 336	30 604	31 940	3 130	14 737	17 867	9 728
フ シ ー ト	板・合 成 皮	0	9 597	9 597	0	0	0	0	1 345	1 345	51 240
	パイプ・継手・ホース	0	1 911	1 911	0	700	700	0	2 066	2 066	300
	延伸テープ	0	710	710	0	0	0	4	192	196	200
	その他*	0	5 964	5 964	0	0	0	0	745	745	1 770
内 計	5 119	43 102	48 221	1 336	31 304	32 640	3 134	19 085	22 219	63 238	
輸 送	計	351	10 961	11 312	140	4 729	4 869	208	6 560	6 768	4 700
	合計	5 470	54 063	59 533	1 476	36 033	37 509	3 342	25 645	28 987	67 938

注) \*1 PA6, PA66 及びその他の PA の計  
 \*2 変性ポリフェニレンオキッド, ポリフェニレンサルファイド及びポリアリレートの計  
 \*3 延伸テープ, ヤーン類, モノフィラメント, テグス, 電線被覆, フォーム, ブレンド用, 繊維・紙加工, 接着剤, 塗料, コーティング, ライニング, その他の計

明らかに高性能プラスチックといえる。しかしその性能は非鉄金属にも及ばない。それにもかかわらず冒頭に述べたように、非鉄金属だけでなく、鉄鋼までを代替したのは、先端技術分野における軽量化要求と合致したためと理解される。

戦後、FRP の出現と共に、構造の軽量化が、単に技術要求のみでなく経済要求として強く求められるようになった。それに応えるための材料としての力学的基本パラメータが表 3 の軽構造メリットである。すなわち寸法、特に厚さに厳密な制限がない場合、同一の構造強度あるいは構造の剛性を仮定して、どの材料を用いると軽量化できるかを比較するパラメータで、この値が大きいほど構造は軽くなる。

表 4 に各種材料の軽構造メリットを比較したが、 $E/d$  を除き、エンブラは非鉄金属だけでなく、鉄鋼までも凌駕している。従来、金属特に鉄鋼は強度当たりの価格が、最も安価な材料であることから、かなり余裕のある設計がなされる場合が多かつたのではないと思われる。部品類も軽量化要求が切実になり、かつそれが経済要求にまでなり、最適化設計が求められるようになったことが、エンブラを有利にしたと考えられる。

なお表 1 によれば、前述のように経済要因が代替理由として、最も多く指摘されている。PA, POM, PC などは、非強化の一般グレードで約 830~1000 円/kg(昭和 58 年 6 月)と、まだ原料費はかなり高価である。しかしデザインの自由性、射出成形によつて最終製品(トリミングなど後加工不要)を one piece で生産する速度

が非常に大きいこと、比重が小さいため、体積当たりの価格が有利になることなどによると考えられる。

表 2 及び 4 に熱硬化性 FRP, すなわち GF 及び CF で強化した GFRP 及び CFRP の値を示した。これらは構造用高性能プラスチックで、エンブラの範疇には入らないが、参考のために示したものである。なお一方向強化材とは、繊維を一方向に引きそろえて熱硬化性樹脂で硬化した複合材料で、高弾性率 CF によるものは、弾性率でさえ鉄鋼に匹敵する。この材料をワインディングしたものが、フィラメントワインディングである。現在多くの advanced fiber が開発されており、FRP はより高性能化される期待が大きい。

### 5. エンプラの種類と需要構造

3 で述べた理由だけでなく、現在もなお多くの advanced 熱可塑性樹脂が開発されていることから、エンブラの範囲を決めるのは非常に困難である。表 5 は通産省の調査結果<sup>1)</sup>であるが、ここに示した種類が統計として扱いうるという条件のもとでの、1つの合意と考えられる。もちろんこの他にも、統計的には少量であるが、ポリサルホン、芳香族のポリイミド、ポリアミドイミド及びポリアミドがあり、ポリエーテルエーテルケトン、トリアジン樹脂その他がある。

一般に表中の成形品で工業製品に分類されるものが、狭義のエンブラ(合成樹脂ではなくプラスチックという概念)であるが、その他の分類のなかにも、エンジニアリングな部品が多い。

(単位：t)

ポリブチレン テレフタレート (PBTP)			ふつ素樹脂			けい素樹脂 (SI)			ポリプロ ピレン (PP)	AS	ABS	PPOその 他*2	合 計
強 化	非強 化	計	強 化	非強 化	計	強 化	非強 化	計	強 化	強 化	強 化	強 化および非強 化	
1 374	130	1 504	42	108	150	0	0	0	14 208	4 280	24	1 176	42 677
28	6	34	20	44	64	0	0	0	60	0	0	11	1 415
1 796	448	2 244	22	254	276	44	35	79	4 765	517	674	1 773	26 125
2 436	404	2 840	4	51	55	506	0	506	278	868	316	3 853	25 841
136	113	249	57	569	626	0	0	0	131	5	430	1 465	9 469
499	80	579	0	41	41	0	0	0	235	0	75	195	4 325
105	52	157	2	26	28	0	0	0	267	0	9	0	2 813
6 374	1 233	7 607	147	1 093	1 240	550	35	585	19 944	5 670	1 528	8 473	112 665
23	84	107	0	12	12	0	0	0	1 364	0	30	99	17 365
0	5	5	20	245	265	0	0	0	18	1	7	0	5 710
0	0	0	0	0	0	0	0	0	35	0	0	0	824
6 397	1 322	7 719	167	1 350	1 517	550	35	585	21 361	5 671	1 565	8 572	136 564
0	0	0	125	362	487	0	118	118	68	0	0	0	62 855
0	0	0	10	74	84	0	0	0	5 076	0	0	1	10 138
0	0	0	0	163	163	0	0	0	0	0	0	0	1 269
0	106	106	18	725	743	0	2 096	2 096	365	0	0	0	11 789
6 397	1 428	7 825	320	2 674	2 994	550	2 249	2 799	26 870	5 671	1 565	8 573	222 615
50	30	80	0	410	410	0	138	138	272	61	51	0	28 661
6 447	1 458	7 905	320	3 084	3 404	550	2 387	2 937	27 142	5 732	1 616	8 573	251 276

昭和 53 年の総出荷量は約 25 万 t (プラスチック全体の 3.7%) で、量的には少ない。しかしその後の統計はまだないが、成長率は現在も非常に大きいようである。

### 6. エンプラの今後の課題

材料技術は、一般に素材技術、加工技術及び製品設計技術によつて本来は構成されるものである。汎用プラスチックでは、素材技術以外の技術の比重はかなり低かったが、エンプラの場合はこの 3 種の技術がそれぞれに重要な役割を占めている。

通産省は昭和 56 年度にエンプラの加工技術の開発課題の調査を実施した<sup>2)</sup>。

樹脂メーカーなど供給技術側では、今後 10 年間の有望市場として、電気自動車、カーエレクトロニクス、ソーラシステム、OA 関連機器、ビデオディスク、VTR、データ通信及び産業用ロボットを挙げている。

一般に供給業は、技術開発姿勢として極めてニーズ指向が強い。すなわち企業ごとに収集しているニーズ情報と開発方向には、それぞれかたよがりがあるけれども、供給業の全体を集約した開発課題は、需要業のそれと、非常によく一致している。挙げられた課題は非常に多いが、大別すると 1) 高性能化と高機能化、2) 生産のよ

りいつそうの合理化、3) 精密成形、4) 製品の大型化などが重要課題である。なおプラスチックは寸法精度に難点があり、精度の目標として 10 μm があげられていたが、ビデオディスクに関しては、すでに 0.1 μm をクリアーしている。また大型化については OA 機器などでの巨体が、ストラクチャルフォームの形で、すでに広く実用されているが、昨年ホンダバラーの車体の 1 部に変性 PC が採用されている。なお需要業から強く求められている課題に、金属並みの強度、弾性率をもつエンプラがある。

これらの課題はそれぞれに極めて困難な内容を包含している。しかし 1/4 世紀にわたつて築き上げてきた蓄積と開発力、さらに時の勢いということを考えると、必ずや近い将来にはかなりのものが解決することと期待される。

### 文 献

- 1) 通産省基礎産業局：昭和 53 年高機能樹脂需要構造調査報告書 (昭和 54 年 5 月)
- 2) 化学経済研究所：エンジニアリングプラスチック加工技術の動向とその波及効果調査報告書 (1982 年 3 月)
- 3) 牧 廣，小林力夫：エンジニアリングプラスチック (1983) [産業図書]