

© 1989 ISIJ

解説

プラスチック塑性加工の現状と将来

町田 輝 史*

Application of Plasticity Technology to Plastics Materials
— Current Status and Future View —

Terufumi MACHIDA

1. はじめに

プラスチックの変形挙動は金属のそれと決定的に異なる。そのため、これまでの多くの努力にもかかわらず、たとえば鋼やアルミニウムのように、塑性加工によって効率よく製品形状を得ようとする試みは必ずしも成功を収めているとは言いがたい。しかしその特徴を生かした各種の成形加工法があり、金属の到達し得る形状よりもいっそう価値の高い形状をつくり込むことも可能である。

本稿では、まずプラスチック系材料の種類をのべ、その変形特性を金属の塑性と比較しながら明らかにする。次いで多様な成形加工法を概観しながら、塑性加工技術が果たす役割についてのべる。

2. プラスチックとその複合材料

2.1 プラスチックの生産状況

わが国のプラスチック製品の生産量は、1985年でおよそ439万tである。図1(a)に示すように、一世代前には玩具類や一般雑貨が主な製品であったが、現在では約27%をフィルムが占め、ついでパイプ、機械器具、

発泡材、建材、シートなどと続いている。鋼には及ぶべくもないが生産量を容量に換算してみると、プラスチックはいまや一般工業用材料としての地位を不動のものとするまでに成長したといえよう。

プラスチックの種類では、全消費量の約30%が塩化ビニル樹脂、ついで20%弱がポリエチレンとポリスチレン、約16%がポリプロピレンであり、これら4種の熱可塑性プラスチックで全体のおよそ85%を占める。一方熱硬化性プラスチックは、不飽和ポリエステル、フェノール、ユリアなど数%以下にすぎない。

2.2 プラスチックの種類と特徴

プラスチックは、一般に主結合が共有結合で分子量10000以上に化学合成した有機化合物(高分子物質)に、充填剤、可塑剤、安定剤、着色剤などを配合した人工材料である。たとえば、代表的プラスチックの一つであるポリエチレンは、図2に示すように、炭素の二重結合を解放することで繰返し単位(モノマー)をつないだ長い分子鎖を有している。

表1に主な高分子(ポリマー)の繰返し単位を掲げる。プラスチックは、主にこのような鎖状高分子の集合体であり、ランダム構造や網目構造の無定形(非晶性)であ

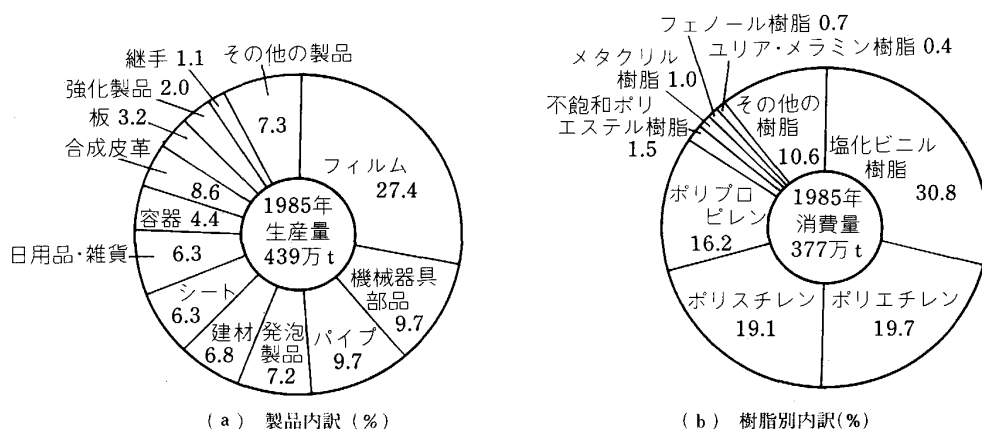


図1 わが国のプラスチック生産の状況

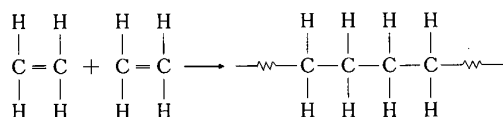
平成元年5月29日受付 (Received May 29, 1989) (依頼解説)

* 玉川大学工学部教授 工博 (Faculty of Engineering, Tamagawa University, 6-1-1 Tamagawagakuen Machida, Tokyo 194)

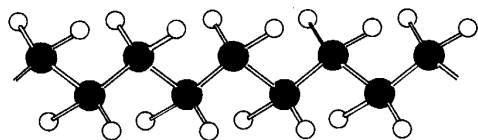
Key words: thermoplastics; thermosetting plastics; composite; mechanical behaviour; strain recovery; non-work-hardening; molding; solid phase forming; quasi-cold working; deep drawing; strengthening.

るが、一部あるいは大部分の分子鎖がラメラ構造のように規則的に配置して結晶化するもの（結晶性高分子）もある。またプラスチックの多くは低温でガラス状態、高温でゴム状態を示す。ガラス状態では分子間力により分子鎖が凝集し、高弾性率を示す。破壊は脆性型になる。ガラス転移温度以上では、体積が増し弾性率が低くなる。ゴム状態では熱揺動により分子鎖が緩み、大きな弾性を示す。

主なプラスチックを表2に示す。単体としてだけでなく、物理的混合（ブレンド）や相溶化処理また反応によって異種材と結合させたポリマーアロイとしても用いる。ABS樹脂がその一例である。これらのうち、熱可塑性プラスチック（Thermoplastics）は、高温での流動化現象（熱可塑性）を利用して成形し冷却して固化する。このプロセスは可逆的であり再成形もできる。熱硬化性プラスチック（Thermosetting plastics）は、分子鎖が短く室温でも流動状態にあり、架橋剤と共に型に流し込み反応させて固化する。このとき加熱することが多い。



(a) 重結合の解除によるエチレンの高分子化



(b) ポリエチレンの分子鎖

図2 ポリエチレンの合成と構造

硬化したものは、分子間が架橋し分子鎖が三次元的に網目構造をとり、高温でも再び流動化せず成形品の形状は安定している。

これらのうち耐熱性、耐衝撃性、耐薬品性、潤滑性、電気的特性などが優れ、工業用材料として多用されるものを、エンジニアリング・プラスチックと呼ぶ。さらに高性能のものがスーパー・エンジニアリング・プラスチックである。

プラスチックを繊維で強化した複合材料を一般に繊維

表1 ポリマーの繰返し単位

高 分 子	繰返し単位
ポ リ エ チ レ ン	$ \begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ & \\ \text{---} & \text{C} & \text{---} & \text{C} & \text{---} \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array} $
ポリ四フッ化エチレン (テフロン)	$ \begin{array}{c} \text{F} & \text{F} \\ & \\ \text{---} & \text{C} & \text{---} & \text{C} & \text{---} \\ & \\ \text{F} & \text{F} \end{array} $
ポリメチルメタアクリレート	$ \begin{array}{c} \text{H} & \text{CH}_3 \\ & \\ \text{---} & \text{C} & \text{---} & \text{C} & \text{---} \\ & & \\ \text{H} & \text{C} & \text{---} & \text{O} & \text{---} & \text{CH}_3 \\ & \\ & \text{O} \end{array} $
ポリ塩化ビニル	$ \begin{array}{c} \text{H} & \text{Cl} \\ & \\ \text{---} & \text{C} & \text{---} & \text{C} & \text{---} \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array} $
シリコンゴム (ポリジメチルシロキサン)	$ \begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{---} & \text{Si} & \text{---} & \text{O} & \text{---} \\ \\ \text{CH}_3 \end{array} $
天然ゴム (ポリイソプレン, cis)	$ \begin{array}{c} \text{H} & \text{CH}_3 & \text{H} & \text{H} \\ & & & \\ \text{---} & \text{C} & = & \text{C} & \text{---} & \text{C} & \text{---} & \text{C} & \text{---} \\ & & & & & & & \\ \text{H} & & & & & \text{H} & & \text{H} \end{array} $

表2 主なプラスチックの名称と転移温度

	日 本 語 名	英 語 名	略記号	通 称	ガラス転移点, 融点(°C)
熱可塑性プラスチック	アクリロニトリル・ブタジエン・スチレン	Acrylonitril-butadiene-styrene	ABS	ABS	97 313
	アクリロニトリル・スチレン	Acrylonitril-styrene	AS (SAN)	AS 樹脂	82
	ポリアミド	Polyamide	PA	ナイロン 6, 66	57 220~265
	ポリカーボネート	Polycarbonate	PC		150 220
	ポリエチレン	Polyethylene	PE		-23 141
	ポリエチレン・テレフタレート	Polyethylene-terephthalate	PET		87 265
	ポリブチレン・テレフタレート	Polybutylene-terephthalate	PBT		22 224
	ポリエーテル・スルホン	Polyether-sulfone	PES		225
	ポリエーテル・エーテル・ケトン	Polyether-ether-keton	PEEK		143 334
	ポリスルホン	Polysulfone	PSF		190
	ポリフェニレン・スルフィド	Polyphenylene-sulfide	PPS		85 285
	ポリアイミド	Polyimide	PI		285
	ポリアミド・イミド	Polyamide-imide	PAI		280
	変性ポリフェニレン・オキサイド	Polyphenylene-oxide	PPO		210
	ポリメチルメタクリレート	Poly (methyl methacrylate)	PMMA	アクリル樹脂	45 160
ポリアセタール	Polyacetal	POM	アセタール樹脂	27 221	
ポリプロピレン	Polypropylene	PP		-13 176	
ポリスチレン	Polystyrene	PS	スチロール樹脂	87 250	
ポリテトラフルオロエチレン	Polytetrafluoroethylene	PTFE	テフロン	325	
ポリ塩化ビニル	Poly (vinyl chloride)	PVC	塩ビ	77 212	
熱硬化性プラスチック	エポキシ樹脂	Epoxy resin	EP		
	メラミン樹脂	Melamine-formaldehyde	MF		
	フェノール樹脂	Phenol-formaldehyde	PF		
	ポリウレタン	Polyurethane	PUR		
	けい素樹脂	Silicone	SI	シリコーン	
ユリア樹脂	Urea-formaldehyde	UF			
不飽和ポリエステル	Unsaturated polyester	UP	ポリエステル		

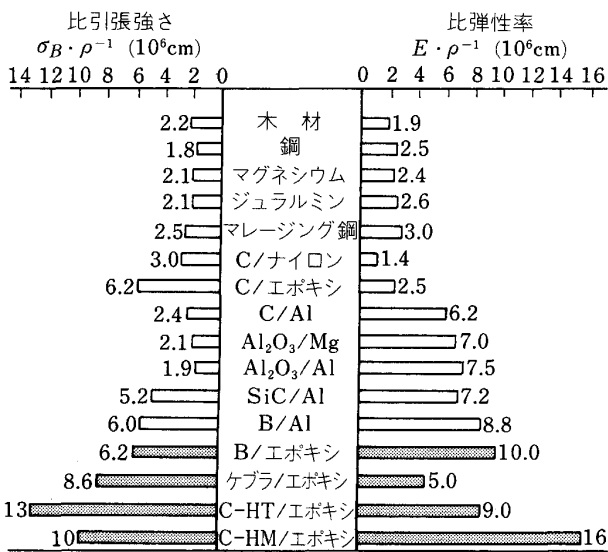


図 3 複合材料と従来材料の比強度, 比弾性 (大蔵ほか¹⁾)

強化プラスチックと呼ぶ。基材が熱硬化性プラスチックの場合に FRP, 熱可塑性プラスチックの場合に FRTP と略記されることが多い。さらに含有繊維の種類を示すためにガラス繊維強化熱硬化性プラスチックを GFRP, 炭素繊維強化のそれを CFRP などと表すこともある。なお二種以上の繊維を含む場合にハイブリッド (Hybrid) FRP と呼ぶこともある。これら FRP や FRTP などのうち、比剛性、比強度、耐熱性などがとくに優れたものは先進複合材料 (Advanced Composite Materials) として位置づけられ、ACM と略称されている。ACM は主に宇宙・航空機用材料として用いられている。

FRP の基材には、エポキシ、ポリエステル、フェノール、メラミン樹脂など、FRTP の基材には、ポリプロピレン、ナイロン、ABS、ポリブチレン、ポリエチレンテレフタレート (PBT)、ポリカーボネート、ポリアセタール、ポリアミドイミド、ポリスルホン、ポリフェニレンスルフィド (PPS) など、ACM の基材には、ポリエーテルエーテルケトン (PEEK) やポリエーテルスルホン (PES) など耐熱性や機械的性質の優れたプラスチックが用いられている。

FRP, FRTP や ACM においてまず重要な特性は、比強度や比弾性率が高いことである。各種材料の比強度と比弾性率を比較した結果¹⁾ を図 3 に示すが、プラスチック系材料の優秀性が目立つ。

表 3 に主な繊維強化複合材料の例を示す。FRP の多くはガラス繊維を主に用いているが、ACM には比強度や比剛性がより大きくさらには耐熱性に優れた繊維が採用される。強化繊維としては、炭素繊維が ACM の最重要素材としての地位を占めており、他に比べ高強度、高弾性率、低比重、高耐熱性を有している。炭素繊維には

表 3 繊維強化複合材料の例

複合材料略称		基 材	繊 維
繊維強化プラスチック (FRP または FRTP)	GFRP GFRTTP RFRP CFRP Ar-FRP SiC-FRP Al ₂ O ₃ -FRP	プラスチック	エポキシ樹脂 フェノール樹脂 不飽和ポリエステル PET, PBT ポリアミド ポリアミドイミド ポリスルホン PEEK その他
繊維強化金属 (FRM)	BFRM CFRM SiC-FRM Al ₂ O ₃ -FRM	金属	アルミニウム マグネシウム 銅 チタン タングステン その他
繊維強化セラミックス (FRC, C/C)	SiO ₂ -FRC SiC-FRC C/C	セラミックス	シリカ グラファイト その他

レーヨン、ピッチ、ポリアクリロニトリル (PAN) を原料とするものがあり、ピッチ系は原料価格が低いという特徴を持つが、強度に優れる PAN 系が主に生産されている。さらに比強度の大きい有機繊維にアラミド繊維 (ケブラー) がある。ACM 用として最初につくられたポロン繊維はタングステン芯にボロンを被せたものであるが、直径が大きく、高比重かつ高価格のため、炭素繊維やアラミド繊維によって代替されつつある。そのほか炭化珪素繊維や高融点熱可塑性樹脂からつくられるポリエーテルエーテルケトン (PEEK)、ポリフェニレンスルフィド、ポリアリレートなど繊維の改善・開発の動きはなお盛んである。

プラスチック自体は、一般に軽量、高比強度、耐食性、断熱性、絶縁性、緩衝性 (弾性係数は鋼の 1/10~1/100)、自己潤滑性、成形性、複合性、組立性、塗装性、彩色性、低エネルギー原単位などの点で優れている。一方耐熱性 (熱変形温度 60~200°C)、寸法安定性 (線膨張係数は鋼の約 5 倍)、機械的特性 (引張強さは 10~90 MPa)、耐久性、塑性加工性、機械加工性、などの点では劣る。

複雑形状の一体成形部品点数の削減、組立工程の短縮、軽量で高強度などの点から、プラスチック系複合材料が航空機、事務機、エレクトロニクス関連部品、更に建築用材料としても大量に用いられつつある。図 4 は民間航空機用材料の推移を示す²⁾。アルミニウム合金が Al-Li 合金に代わりつつあり、繊維強化プラスチックが更に用いられるようになり、その結果 2000 年には全重量が約 10% 軽減されると予測されている。自動車関連でも塗装性や焼付け時の熱に対する安定性などの課題を解決することによって、外装部品 (ボディ) のプラスチック化が進行する可能性がある。

3. プラスチックの力学的性質³⁾

3.1 応力-ひずみ曲線

プラスチックの公称応力-公称ひずみ曲線を、塑性加工用金属材料のそれと比較して模式的に表したものが図

5(a)である。一般に熱硬化性プラスチックは、鋳鉄など非塑性金属と同様に弾性が終わると直ちに破断する。熱可塑性プラスチックでも、アクリル、ポリアセタール、ABSなどは室温以下では延性を示さない。

金属の場合は降伏点を過ぎて塑性領域にはいると、応力はひずみが増すにつれて増し（加工硬化）、やがて最大値（引張強さ）に達したのち破断する。破断までの伸びはたとえば軟鋼で約45%、18-8ステンレス鋼で約55%である。

これに対して、熱可塑性プラスチックは、図6に例

を示すように、加工硬化現象がほとんど見られない。応力の値は軟鋼の1/2~1/10という低さで、逆に伸びの値が著しく大きく、金属の感覚からいえば“超塑性”といえるような100%以上伸びるものも珍しくない。温度やひずみ速度による応力-ひずみ曲線への影響⁴⁾⁵⁾も比較にならないほど大きい。

ところで、プラスチックの大きな伸びは、塑性加工に関わる多くの人たちに幻想を抱かせたが、しかし、結論的にいえば、よく伸びる材料であるからといって、必ずしも金属のように塑性加工できるということではなかった。

3・2 非硬化性とひずみ集中

熱可塑性プラスチックの非硬化性は、塑性加工たとえばプレス加工の一つの障害になる。金属の場合は、変形を受けた部分が直ちにひずみ硬化または加工硬化するので、さらに変形を増大するためには、隣接の未硬化部を変形させるほうが容易であり、結果として全体が一様にひずむ。また真応力(σ)-真ひずみ(ϵ)関係を表す n 乗硬化則 $\sigma=c\epsilon^n$ 式で、加工硬化指数 n 値が一樣伸びと同じ意味をもつことは数学的にも証明される。 n 値が大きいと、曲げ、伸びフランジ、張出しといった応力勾配が存在し、かつ材料の延性が要求される加工では有利になる。

この一樣伸びの機構は、加工硬化しないプラスチックでは存在しない。プラスチックでは、まず一部分がくびれたのちそれが徐々に拡大して全体が伸びる。写真1(a)にポリプロピレン薄板の引張変形の状況を示す。プラスチックの示す大きな伸びはくびれ伸びの伝播によって与えられるもので、金属の場合のように直ちに延性と結びつけるわけにはいかない。なお、金属でも高温クリープや超塑性の場合に類似の変形挙動をするが、それはきわめて限られた条件で生じるものである。

プラスチックには加工硬化がないので、プレス加工のように応力勾配が存在する条件下での変形の場合には、変形は成形品の角、隅とか辺に集中してしまう。すなわち穴があいたり破断したりすることはないとしても、ご

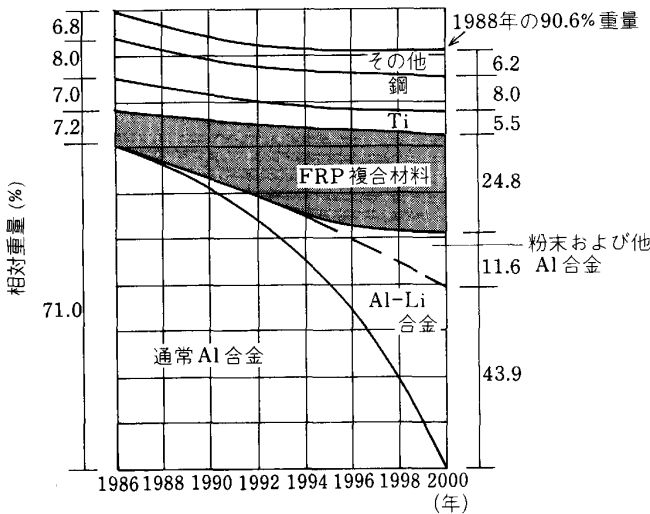
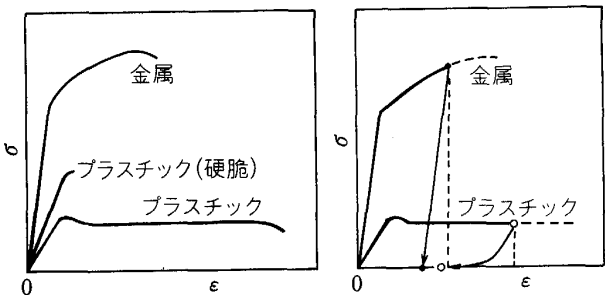


図4 民間航空機の材料構成の予測²⁾



(a) 応力-ひずみ曲線の例 (b) 弾性およびひずみ回復

図5 金属とプラスチックの変形挙動の比較

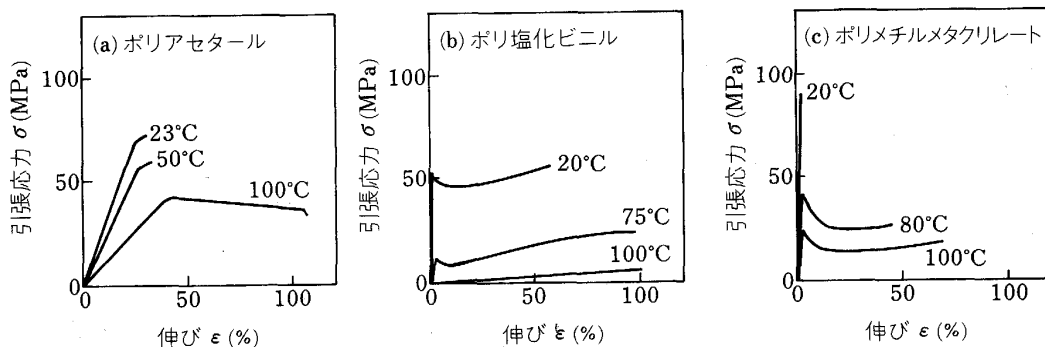


図6 熱可塑性プラスチックの引張応力-ひずみ曲線の例

く限られた部分だけが紙のように薄く、他の部分はもとの厚さのままという惨めな成形品しか得られない。そのような板厚不同が大きい製品は、とうてい実用的とはいえない。

3.3 経時的ひずみ回復現象

種々の材料に、ある量のひずみを与えたのち除荷した場合の挙動を模式的に図 5(b)に示す。金属は弾性の分だけ瞬間的にひずみ回復（スプリングバック）する。この弾性的回復ひずみは製品の寸法精度上かなり問題となることも多いが、永久変形として残る塑性ひずみに比べるときわめて小さい。すなわち金属の場合は負荷によって得られる形状は、ほぼそのまま保存される。

これに対してプラスチックの場合は、除荷直後に金属よりも大きな弾性的ひずみ回復を示すだけでなく、それ以後も時間とともに与えた変形が減少していく現象があ

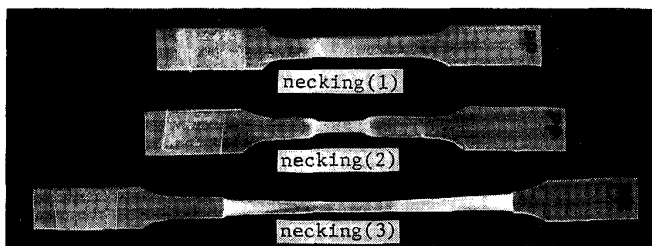
る。いわゆる経時的ひずみ回復である。一例として、写真 1(b)は引張試験で伸ばされたポリプロピレン試片の加熱による形状変化を示す。試験直後かなり大きな“伸び”を示したものが、比較的低温の加熱で自然に縮んで（熱的ひずみ回復）原形にもどっている。このことは、熱可塑性プラスチックを冷間変形加工した成形品が、時間がたつにつれて加工で与えられたひずみを解放し原形へ復帰していくこと、その傾向は夏季においてまた熱を加えるといっそう顕著になることを意味する。

この種のひずみ回復現象^{6)~8)}は、加工品形状の熱的・経時的変化を引き起こすので大きな問題となる。従来、高温とくに融点以上の温度で成形して製品を得るのがプラスチック加工の主流であったのは、このひずみ回復すなわちプラスチックメモリー（一種の形状記憶）現象を避けるためでもあった。金属の形状記憶はきわめて特殊な処理と条件で生じるのに対し、プラスチックのひずみ回復は、ごく普通に起こり、それを抑止するのがきわめて難しいといえる。

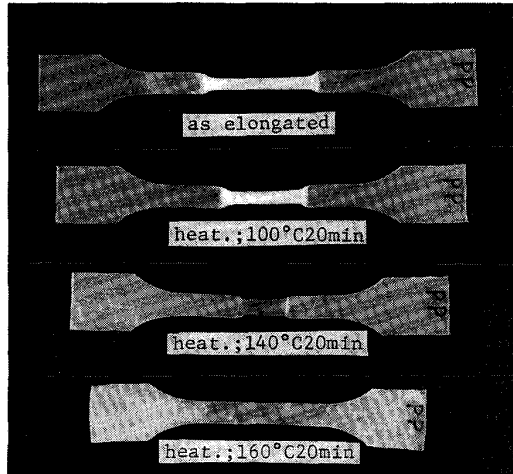
3.4 熱誘起変形

高温とくに融点以上でプラスチックに与えたひずみは、冷間で与えたものと違って、安定なものと思われていた。しかし、通常の使用条件では隠れているが、ある条件になると形状復元をもたらす強い記憶が成形品に残っている。たとえば一般の熱可塑性プラスチックの棒材や薄板は、押し出しかカレンダー成形法によって得る。これらの成形（一次加工）はその融点以上の高温（溶融状態）で行うが、このような高温下でひずみを与え固化したにもかかわらず、再び高温に保持するとそのひずみを解放するような“変形”現象を示す。筆者らはこのような現象を見出し熱誘起変形（Recovery-induced thermal deformation）と名付けた^{9)~11)}。

写真 2(a)は、直径 100 mm の高密度ポリエチレンの市販の押し棒を厚さ 3 mm にスライスして表面研磨したプランクと、それを 140°C に 15 min 保持したものの外観写真である。まったく外力の助けを借りずに、押し出しか逆方向に膨らみ、円すい状に成長しているのがわかる。この種の現象は、もちろん温度や時間依存性は多少違うが、ポリプロピレン、ポリアセタール、ナイロン、アクリル、ポリ塩化ビニルなどでも確認された⁹⁾。この

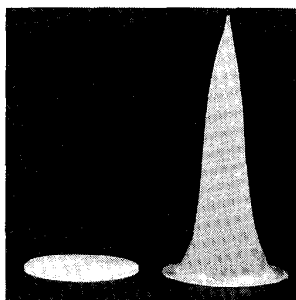


(a) 局部くびれの伝播による伸び

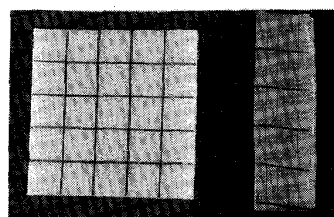


(b) 加熱による伸びの消滅

写真 1 ポリプロピレン薄板 (t_1) の引張変形挙動およびひずみ回復現象



(a) 輪切り板 (140°C 10 min)



(b) 薄板 (220°C 10 min)

写真 2 高密度ポリエチレンの棒の輪切り板 ($\phi 100 \times t_3$) と薄板 ($150 \times w 50 \times t_3$) の熱誘起変形による形状変化

変形は、押出しの際、材料流れの速度勾配が存在し、それゆえ生ずるせん断ひずみが回復しないまま常温まで運ばれて、やがて輪切りされ再加熱されたときに回復するために生ずる⁹⁾¹¹⁾。

写真 2(b)は、薄板の熱誘起変形現象を示す。高密度ポリエチレン、軟質塩化ビニル、ポリプロピレンなどの薄板を、融点あるいはそれ以上の高温に加熱すると、一次成形の方向に縮み、その分板厚が増す¹⁰⁾。この場合も、一次加工（カレンダー成形や押し出し成形）の際に、付加されたひずみ（主に平面ひずみ、板厚が縮小し加工方向に延伸）は、その時点では回復せず凍結されているが、後に高温に保持したとき一気に励起され熱誘起変形として現れるものである¹¹⁾¹²⁾。

3.5 プラスチックの変形機構

プラスチックでは、重合あるいは縮合によって長い鎖状の分子が作られている。原子がその平衡位置から多少ずれることで現れる弾性変形では、金属との間にそれほど差はないと思われる。しかし熱可塑性プラスチックが示す“降伏”は、高度の結晶性でもまた非晶性でも、さらには両者が混在する場合でも、長くつながった鎖状分子が外力を受けて何らかの変位¹³⁾をするときの累積現象と見ることができる。

見掛け上どんなに大きな“降伏”あるいは、“延性”があったにしても、破断するときを除けば、鎖が切れたり原子の相対的配置が変わることはないので、金属のすべり変形の場合のように、それ以前と類似の、しかし以前とは無縁の新たな平衡状態になることは決してない。そのためたいていの場合、鎖は外力から解放された途端、無理に変形を強いられた不安定状態から、それ自身の本性に基づいて変形前の安定な状態へ戻ろうとする。構造変化を必然的に伴うガラス転移点や融点などの温度以上に加熱すると、分子鎖の熱揺動が激しくなるため、ひずみ回復をもたらす変化はいっそう劇的になってくる⁷⁾。

非常に大ざっぱな言い方であるが、熱可塑性プラスチックに金属のような塑性加工性を付与しようとするなら、ほどほどの長さに分子鎖を短くするか、変形加工（負荷、変形）時に切断しやすい分子鎖にして、変形様式を工夫し変形後の新秩序を保存する方策が必要である。また複合化などの手法で内的ピンニングにより不動分子鎖にする工夫、合わせ板などのように金属材料の助力による形状固定（外的ピンニング）などが必要であろう。

なお物質構造や微視的変形機構とは直接関係ないが、プラスチックの機械的性質もしくは粘弾性を説明するために、古くから図 7 のような力学モデルがよく用いられる。ここでスプリングは、フックの法則に従う瞬間回復する弾性的変形を、ダッシュポットがニュートン的な粘性を伴う分の変形を表している。さらに摩擦板をも加えた要素、更にそれらの要素を直列あるいは並列に組み合わせた力学モデルは、幾つも考えられている。それら

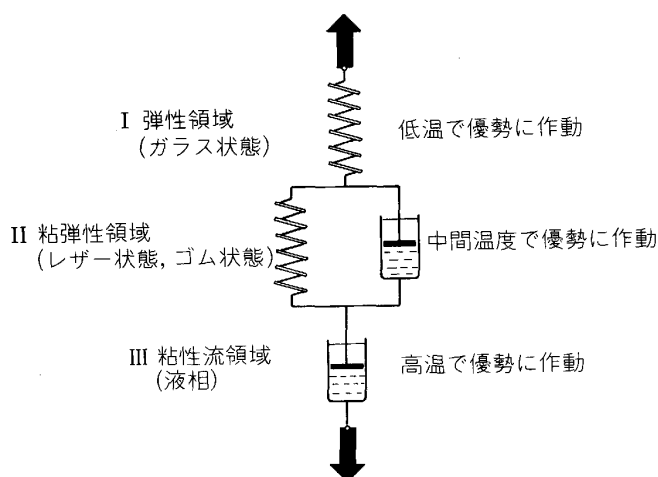


図 7 プラスチックの粘弾性を表現しようとする一つの力学モデル

のモデルは、変形の本質を示すものとして見るにはふさわしくないが、プラスチックの力学的挙動をある程度分かりやすく説明することができる。近年コンピュータ数値実験で、応力-ひずみ関係をより定量的に表現する構成方程式づくりが盛んに行われているが、同種の考えを発展させたものと見ることができよう。

4. プラスチックの成形加工

4.1 加工システムの特徴

プラスチックとその複合材料の成形加工は、幾つかの点で金属製品の加工システムとは異なる。熱可塑性プラスチックの場合、原材料の形態は繊維含有率の有無に関わらずペレットが多く、これを加熱溶融し金型（モールド）内で加圧成形して最終形状をつくり込む。熱硬化性樹脂の場合、原材料は溶体が多く、複合化の必要があるときには繊維とともに金型（モールド）に注いで保持し硬化反応によって製品を得る。すなわち大多数の製品の場合半成品や中間製品の形態を経ないで一気に最終製品形状を得る。金属でいえば加圧 casting, ダイカスト, 連続 casting/圧延 (CCDR), 半溶融・凝固加工の方式に類似のプロセスであるといえる。

ペレットを加熱溶融して金型から押し出すなどの方法で板、フィルム、棒、線を得たのちに、塑性加工に似た二次加工を行って所望の製品を得る方法も行われているが、前述のようにプラスチックが金属のような塑性を持たないため主流ではない。二次加工の際、ガラス転移点などの特異温度を鉄鋼の変態点のように意識して注意深く加工するわけでもない。加工硬化や再結晶温度がないため冷間加工と熱間加工の厳密な区分もない。強いていうなら、室温加工と加熱加工に区分される。加工機械の容量は金属に比して、かなり小さくて済む。

以下プラスチックの成形加工法を、便宜上ペレットを溶融成形して最終製品を得る方法、中間製品を半溶融成

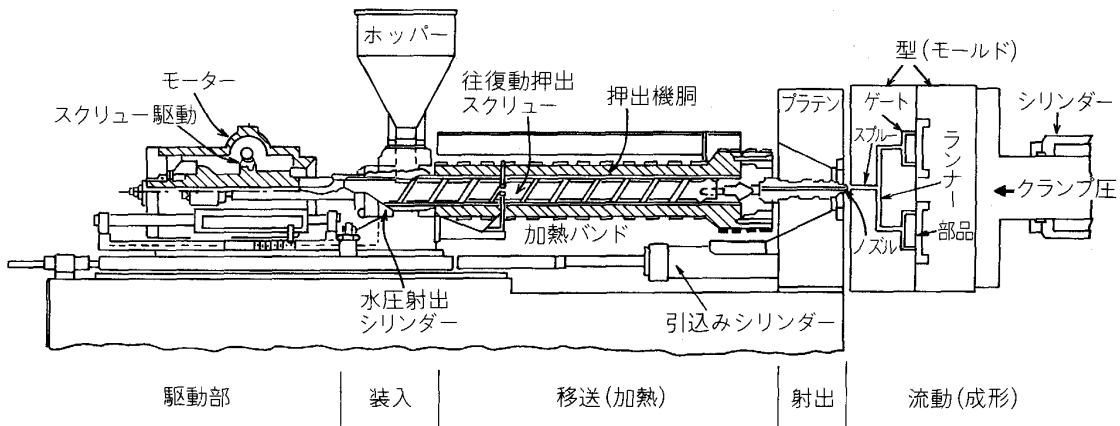


図8 スクリュー式射出成形の方法

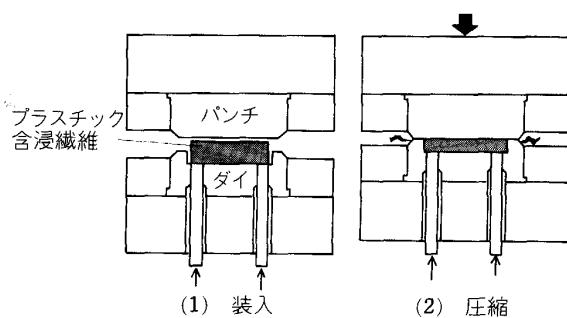


図9 圧縮成形の模式

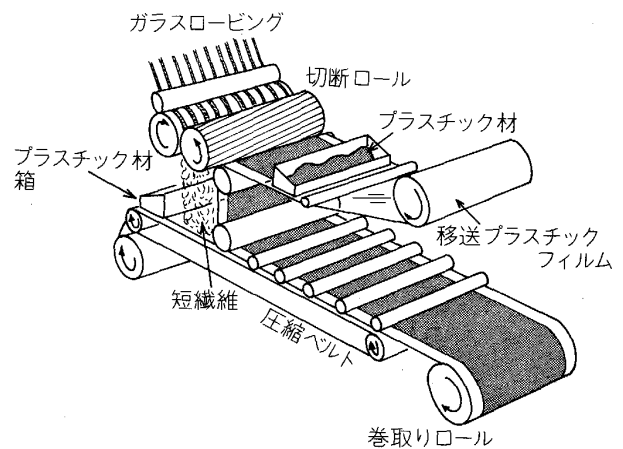


図10 SMC薄板の製造法

形して最終形状を得る方法、固相での変形加工を利用する方法および擬似冷間塑性加工方法に分けて、代表的プロセスを見ることにする。

4.2 溶融成形プロセス

プラスチックの溶融成形には、次にのべるような多種多様な方法が用いられている。

(a)射出成形：日常雑貨、各種容器・ケース類、電子部品、機器など比較的小型の製品を得るために最もよく用いられる量産方式である。通常、単体あるいは2~3mmまでの長さの短繊維を含んだペレットをチャンバー内で加熱しながらプランジャまたはスクリューで順次前方に送りつつ溶融かつ混練し、先端で往復動作（ピストン運動）によって溶融体を急速に射出する。

図8に射出成形装置の模式を示す。射出されたプラスチックはスプルー、ランナー、ゲートを経て所望製品の形状の金型に急速に送られ数秒程度加圧保持される。プラスチックが固化し温度が下がるのを待って成形品を取り出す。ここで金型設計は、歩留り、製品取出し、生産性のみならず、金型内での適切な材料流動および製品の形状と品質を保つために重要である。

発泡材射出成形、異種の材料を同時に射出成形することによる多層成形、また射出と圧縮の複合成形などが行われる。また熱硬化性樹脂の場合には、金型へ射出する直前に硬化反応が生じるように温度および原材料を選

ぶ。この方式を反応射出成形（RIM）という。

(b)圧縮成形：図9に示すように、雌雄の一对の金型に長繊維とともに未硬化の熱硬化性プラスチックを送り、加熱加圧して硬化反応させるものである。SMC (Sheet Molding Compound) 法の場合、たとえば13mm長のチョップドガラス繊維を含有する不飽和ポリエステルなどの熱硬化性プラスチックのSMC薄板を、約150°Cの金型内で7~14MPaで1~3min圧縮しながら流動充満し硬化反応させる。流動のさいに繊維が不均一分布しがちの点が難点といえる。フード、テイルゲート、トラックキャブ、フロアなどの生産に自動車産業でよく用いられている。繊維の種類、長さおよび含有率はいろいろである。自動車のトリムや車体には、繊維含有率27~30wt%のものが多く用いられる。

図10に示すように、SMC薄板の多くは繊維と樹脂その他添加物をナイロンあるいはナイロン/ポリエチレン膜でコンパクションローラーを用いてはさんだもので、コイル状になっている。使用時には膜を除去する。硬化反応が生じる可能性があるので短期間しか保存（冷蔵）できない。

(c)レジントランスファー成形（RTM）：単純なもの

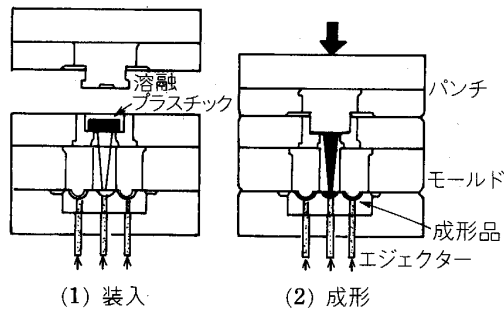


図 11 プラスチックのトランスファー成形の模式

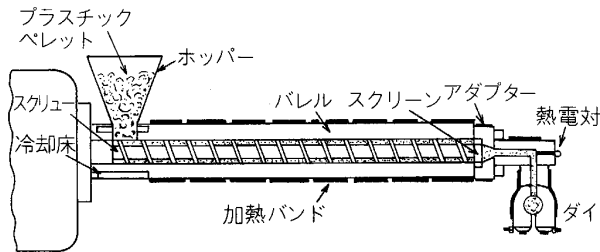


図 12 スクリュー式押出成形の方法

から複・高性能材また小から大寸法まで多岐にわたって利用されている。この方法は図 11 に示すように、乾燥ガラス繊維のマットをまず所望の形にブランピングして加熱した金型内に装入し、そこへ熔融プラスチックを低圧力 (690 kPa 程度) で注入 (トランスファー) しそのまま硬化反応をすすめるもので、低圧圧縮成形法である。

樹脂の注入を容易にするため真空を利用する方法、あらかじめエポキシ型でガラス繊維のプリフォームを得る方法、反応射出成形を適用する方法などの工夫もなされている。一般に成形サイクルは長く、大形部品のプリフォーム法で 6~9 min 程度である。しかし、低圧法なので、大形パネルの生産も低容量プレス機で可能である。またフォーム材をコアに用いると複雑形状を得ることもできる。一体成形できることから、自動車部品生産などに用いられる。

(d) 押出成形: 図 12 に示すように、ペレットを熔融しつつスクリューで順次前方へ送りダイスから押し出す方式である。この方法の特性上、得られる棒、板、管には繊維が含有されないか少量の短繊維が含有されるにすぎない。なお、びん、フィルムなどは、薄肉管を押し出したのち空気吹込み (ブロー成形、インフレーション成形) する方法によって得る。

(e) 繊維強化材 (管、棒) 成形: 各種の方法があるが、たいいていは平板上に複合材をおきマンドレルをそれに押しつけて巻きつける。そのためマンドレルを加熱したり、のりを添加したりする。

この種の成形法でもっとも有名なものは、フィラメントワインディング (図 13) である。これはプラスチックを成形前あるいは成形時に含浸させた繊維束プリプレ

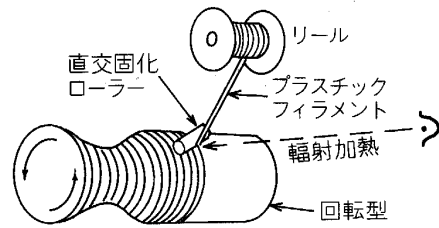


図 13 熱可塑性プラスチックのフィラメントワインディングの模式

グをマンドレルに巻きつけて覆い硬化反応をまっ、銅製あるいは水溶性のマンドレルを取り取り中空体を得るプロセスである。高価な繊維を安価な樹脂で複合しながら高速で精度よく成形する低コスト生産システムであり、また繊維含有率を最高にとることが可能なため高强度成形品が約束される。素材形態にはプリプレグや含浸繊維のほか乾燥繊維 (樹脂スプレー) の場合もある。大形容器、ロケットのモーターケースなどの生産に用いられ、NC 制御された各種の装置が開発されている。

同類の技術であるが、コンピューター制御編み機を用いて二次元あるいは三次元織物としながらネットシェイプを得るブレイディング法 (Braiding) がある。またブルルージョン (Pultrusion) 法は連続強化繊維束を熱硬化性プラスチックに含浸させたのち、ダイスから引き出しつつ硬化反応させることによって各種断面形状の ACM を得る。

(f) 一体成形法: FRP 船などの場合には、未硬化のエポキシを塗布またはスプレーしながらガラス長繊維マットを手積み (ハンドレイアップ) する方法が一般にとられる。主に常温放置により硬化を待つ。一方航空機胴体パネルなどの部品の場合には、たとえば炭素繊維強化エポキシプリプレグを積層してから、真空ナイロン布バック中で脱気 (真空バック) したのち、オートクレーブ (加熱加圧タンク) 中で静水圧力を加えながら 120~180°C の温度範囲に 2~4 h 加熱保持することにより、硬化反応 (キュアリング) させる。取り出した製品は再度加熱 (ポストキュアリング) して反応を完成させる。

(g) 粉末成形法: 熱可塑性プラスチック粉末の単体あるいは繊維の混合物を粉末成形 (圧粉) する。成形品のひずみ回復防止のために、成形後形状安定化熱処理する、あるいは超音波を導入して成形する試み¹⁴⁾¹⁵⁾ や、粉末を回転金型に入れ熔融成形する回転成形法もある。粉末遠心成形法 (図 14) は誘導加熱と水冷の方式を導入することで、成形速度を改善し遠心力を利用して緻密化を計って繊維含有やブレンド材から成る種々の形状の中空製品を得る¹⁶⁾。また図 15 に模式を示すように、カレンダー成形は何組かの加熱ロール間隙を順次通過させることにより、薄板を得る方法である。

4.3 半熔融成形プロセス

前項では原材料から直ちに最終製品を得る成形プロセスを述べたが、まず安定な素材材を得たのちに熱間プレスを用いた流動成形によって容器などの形状を得る方式も多用されている。

(a)スタンピング法：シートモールドコンパウンド(SMC)法と同様に、成形サイクルの短縮や既存プレスの利用ができるという観点から、熱可塑性プラスチックの圧縮成形も行われている。この方法は自動車関係者か

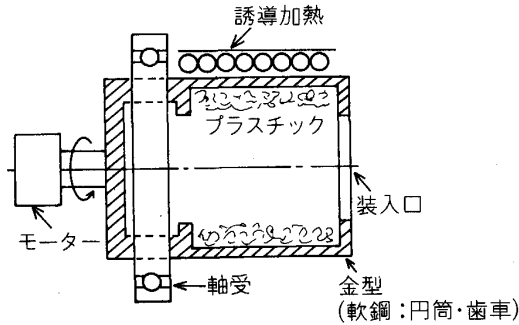


図 14 プラスチック粉末の遠心成形法

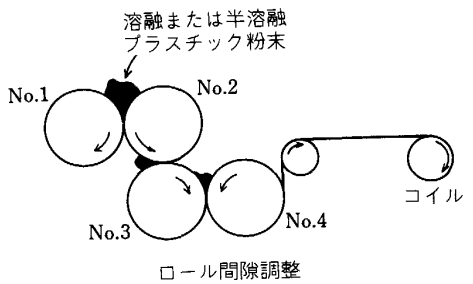


図 15 カレンダー成形の一つの方式

ら金属薄板の加工にならって、スタンピング、また用いる板はスタンプルシートとも言われている。図 16 にスタンプルシートの成形工程を示す。繊維強化プラスチックを予熱して装入し、金型を閉じて圧縮流動を生ぜしめたのち、そのまま冷却し金型を開いて成形品を取り出す。サイクルタイムは 25~50 s である。バンパーバックアップビーム、シート、床などの自動車部品、事務用椅子から大型機械ハウジングなどを低コストで生産するために広く用いられている^{17)~19)}。また自動車外板材としても期待される²⁰⁾。

(b)スタンプルシート：熱可塑性プラスチックを基材にしたもので各種のものが開発されている。そのうち AZDEL (米国 GRTL 社) は、ガラス繊維を 40% (重量) 含有させたポリプロピレン薄板で、比重 1.19, 引張強さ 84~112 MPa の性質を持っている。また STX (米国 Allied Chemical 社) は、ナイロン 6 を含浸させたもので、例えば STX 250 は、比重 1.46, 引張強さ 141 MPa の薄板である。表 4 に他材料と比較して機械的性質を掲げる。また図 17 にその組織構造の例を示す。その他木粉を含有したポリプロピレンなどがある。また物理的性質や機械的性質を改善した連続繊維強化ポリエーテルエーテルケトン (PEEK) やポリフェニレンスルフィド (PPS) は、航空機関係部品に用いられる。なおスタンプルシート (X シート) を用いて、材料流動を伴う深絞りを試みた例もある²¹⁾。

4.4 熱間固相成形プロセス

いわゆる塑性加工の概念に近い熱可塑性プラスチックの流動ないし変形による成形法も、種々試みられまた実用されている。

(a)圧縮成形・鍛造・転造・押し出し：アクリル厚板を熱間

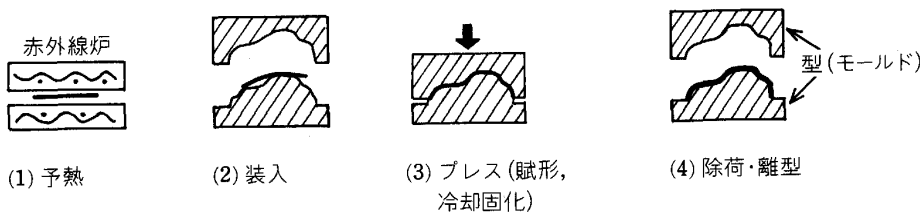


図 16 スタンプルシートの成形工程

表 4 スタンプルシートと他種プラスチックの機械的的特性の比較 (ASTM 法による)

製 品	ADZEL (X シート)	STX 250	SMC	マット強化 FRP	短繊維強化射出成形品		
	ポリプロピレン	ナイロン 6	不飽和ポリエステル	不飽和ポリエステル	ナイロン	ポリエチレン	ポリプロピレン
ガラス繊維含有率 (wt%)	25~40		15~30	23~28	10~60	20~40	20~40
比 重	1.19	1.46	1.8~2.1	1.35~1.45	1.21~1.70	1.1~1.28	1.1~1.3
引張強さ (MPa)	84~112	113	60~130	80~100	95~230	50~80	70~85
弾性係数 (MPa)		7 650	11 000~18 000	5 600~8 000			4 000
破壊伸び (%)		2.25	0.3~1.5	1~2	1~4	2~3	
曲げ強度 (D-790) (MPa)	140~180	177	130~210	160~200	120~340	70~100	120~140
曲げ弾性係数 (MPa)	5 600	7 520	9 800~13 000	5 600~8 000	4 690~19 600	4 300~7 700	4 400~4 600
アイゾット衝撃値 (ノッチつき) (kg·cm·cm ⁻¹)	80~100	15~20	35~45	35~40	15~25	15~20	12~20
熱変形温度 (1.85 MPa) (°C)	155	193	200~260	180	190~215	120~125	145

で圧縮して航空機窓などに用いられる強度の大きい有機ガラスを得る、薄板をフレネルレンズ金型で圧縮しオーバーヘッドプロジェクターなどの大寸法レンズを得る²²⁾などの方法がある。ポリエチレン等で歯車成形の試み²³⁾²⁴⁾も行われている。その他ポリプロピレンや超高密度ポリエチレンの熱間鍛造²⁵⁾、ポリプロピレンの飲料缶への間接押し出し²⁶⁾などが試みられ成功を収めている。

(b)圧力差成形：高温に予熱した薄板を金型になじませて容器状の成形品を得るプロセスである。食品類の薄肉容器の大部分は真空成形や空気圧成形（ブロー成形）で得る。プラグの補助や予張出しを含むことが多く、真空と空気圧を組み合わせることも多い。

FRTP や ACM などは、ブランクを圧力チャンバー内で耐熱プラスチックフィルムまたは超塑性アルミニウムの膜ではさみ、真空と空気圧を組み合わせることで変形を与

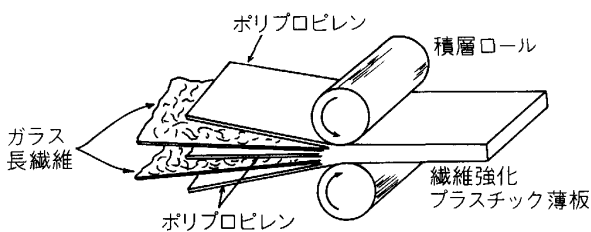


図 17 一つのスタンパルシートの積層による製造法の模式（ガラス繊維強化ポリプロピレン薄板（Xシート）の例）

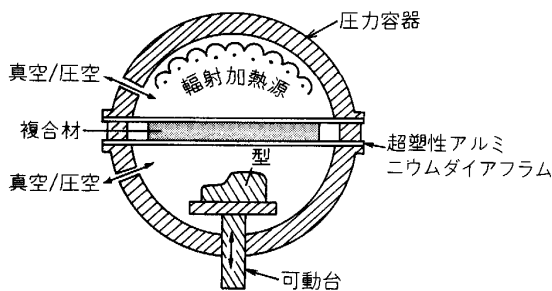
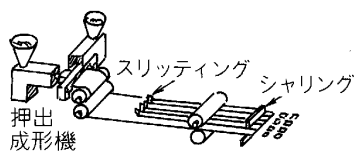
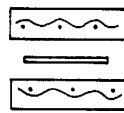


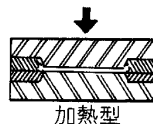
図 18 ダイアフラム成形法の例



(1) 薄板製造とブランキング



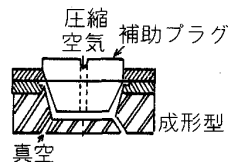
(2) 予熱



(3) 予成形（圧縮・延伸）



(4) プリフォーム



(5) 真空・圧空成形



(6) 製品容器

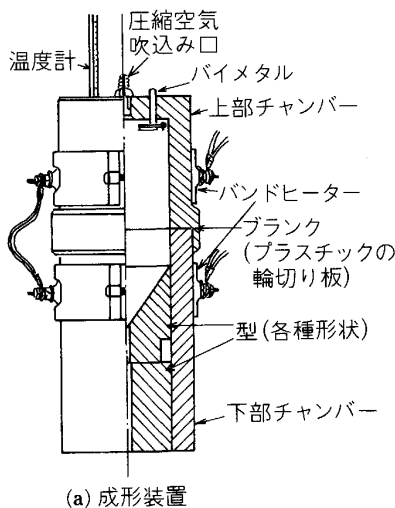
図 19 スクラップレスフォーミングの工程

え、可動工具になじませる。このような方法（図 18）をダイアフラム成形²⁷⁾という。このうちゴム膜を介して液圧を用いる成形法をハイドロフォーミングと呼ぶ。圧力媒体にゴムを用いる方法はゴムブロックフォーミングと呼ばれる。融点直下に加熱したシートを雌型の上に置き上型を下ろし、膜の背後に7~35気圧を作用させて張り出して雌型になじませたのち10~15s保持して製品を得る。ポリプロピレンの場合、ペレットから押し出し機で板を作り、直ちに所定寸法にブランク取りをしてダイアフラム成形する熱経済性のよい一貫生産システムもある。

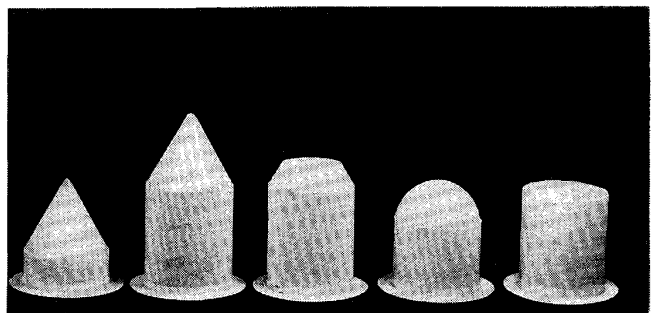
スクラップレスフォーミングは米国 Dow Chemical 社で開発されたものである²⁸⁾²⁹⁾。図 19 に示すように、まず押し出し成形薄板をただちに切断して、正方形のブランクを得る。次にブランクを潤滑したのち赤外線炉で融点以下に加熱する。加熱されたブランクは、プレスの加熱板により圧縮されて流動し、薄い円板になる。そして周縁をわずかだけ工具でつかみ、次のステーションで圧空成形するというくずを出さない方法である。

熱誘起成形³⁾⁹⁾³⁰⁾は、押し出し棒から切り出した輪切り板を熱誘起変形しプリフォームを得たのち、ただちに低圧ブローする筆者らが提示した特異な方法である。装置の模式を図 20(a)に示す。上下チャンバーは外部発熱体で温められるようになっており、チャンバー内の温度は温度計やバイメタルで測定・制御できる。また下部チャンバーには、種々の形状のダイス（型）を組み込むことができる。

上下チャンバーの間に、セット（単純支持）された板は、所定温度に所定時間保持する間に下側へ熱誘起変形し、一様ひずみ分布の円すい形状に成長する。その先端が底型に接する頃合いを見て、コンプレッサーの圧縮空気（常温）を吹き込んで瞬時に張り出して型に密着させ成形品を得る。図 20(b)は、ポリエチレン輪切り板（φ100×t3）を、熱誘起変形後、低圧ブローして、種々の底形状をもつ外径φ80の円筒カップへ熱誘起成形した例であり、先端や底また肩部のアールは、ほぼ零である。



(a) 成形装置
 図 20 プラスチック薄板の熱誘起成形方法と成形品の例



(b) 成形カップ

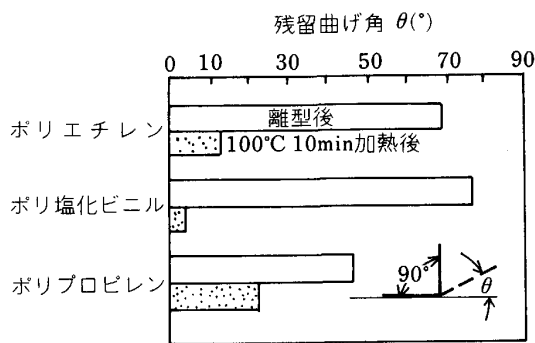


図 21 プラスチック薄板 (t_3) の 90°V 曲げ成形品に見られる大きなスプリングバックとひずみ回復

(c) 長尺材の成形: ロールフォーミングは、予熱ブランクを一連のロールを用いて順次成形する。プルトレーションは、ダイス内の拘束時間を長くして繊維を引き出す。テープ積層はプリプレグテープを積層するもので広い面積を持つ部品を得るのによい。気泡を防止するためオートクレーブおよび真空バッグ成形する場合もある。フィラメントワインディングは繊維を局部加熱しながらマンドレルに巻く。

4.5 擬似冷間塑性加工

すでにのべたように、プラスチックの冷間加工はひずみ回復などの問題が多く難しい。実用化されている唯一ともいえる例は、米国 Borg-Warner 社の ABS 薄板のマーガリン容器などへの深絞り成形であろう。

これまで冷間におけるすえ込み、深絞り、ロールフォーミングなどが試みられたが主として熱的ならびに経時的ひずみ回復の問題があり、前述のようになかなか難しいというのが結論である。たとえば図 21 は板厚 3 mm の薄板を 90 度に V 曲げをした例である。大きなスプリングバックの後でも成形品の曲げ角度は、100°C に 10 min 保持して温めるとだんだん小さくなり、ついにはほとんど平板に戻ってしまっている。これらの現象は、前

項までののべたプラスチック変形の特徴からくる本質的なものである。

製品の形状寸法がひずみ回復によって不安定なるのを防止するためには、熱の助けを借りるのが当面手取り早い対策である。しかし高温で加工を行うとしても、ブランク全体を加熱するのは、素材の性質や形状を損なうこともあるし、ハンドリングが面倒、またエネルギーコストがかかるなどの問題も伴う。このような問題をなるべく抑えながら熱間加工の実を取る合理的方法として考えられるのが、必要な部分だけ熱間にする局部加熱加工法³¹⁾である。

曲げの場合に最も適用しやすく、図 22(a)の厚鋼板の線状加熱曲げと同類の考えである。薄板の曲げ変形部分すなわち曲げ線に沿って局部加熱し、ただちに負荷あるいは負荷なしで加工する。この方法は、製品のひずみ回復の防止に止まらず、もろい材料に対しても適用できる方法である。すなわち加熱により曲げ部に延性を付加できるためき裂を生じることなく成形することができる。またプラスチックの冷間加工でしばしば見られる変形部の内部き裂による白化(白濁化)も防止できる。全体としては通常の冷間曲げと類似であるから、作業性も悪くならないという大きなメリットがある。

(a) 局部接触加熱 V 曲げ法: 図 22(c)の方法は通常の冷間プレス曲げ法に、曲げ部のみを効果的に加熱できる接触加熱板を組み込んだ例である。ブランクの曲げ予定部を所定温度の接触加熱プレート(分割ダイスの間に作動)で、接触加熱したのち加熱プレートを離して曲げるか成形終了まで接触加熱を続けて行うものである³²⁾。成形速度をあまり落とすことなく、ひずみ回復、き裂、白化などの欠陥のない良質の成形品を得ることができる。

(b) 熱誘起変形曲げ: 前にのべた熱可塑性プラスチック薄板の熱誘起変形を利用すれば、局部加熱だけで試片

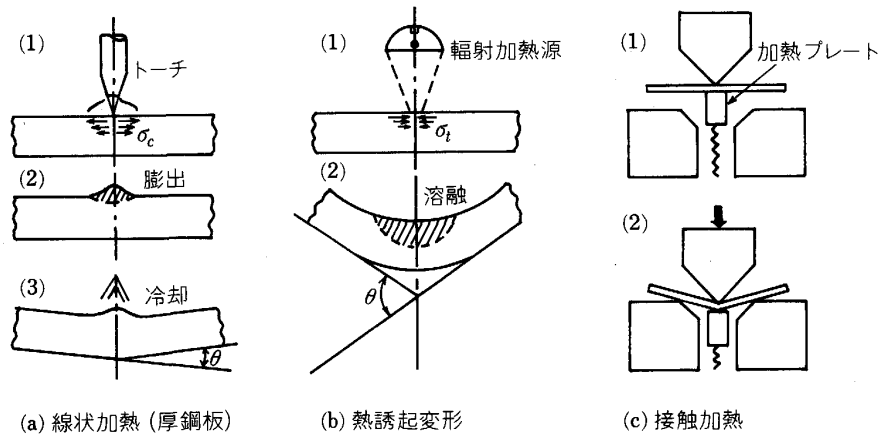


図 22 局部加熱曲げ法の 3 形式

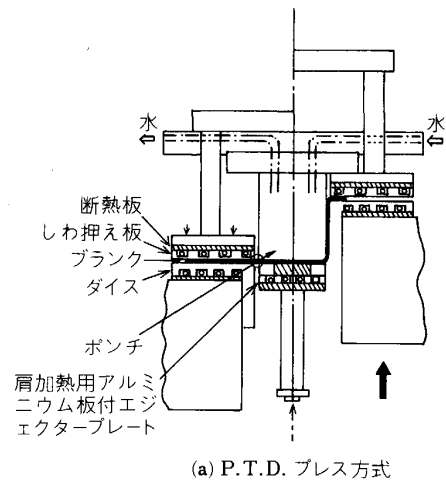
を曲げることができる。すなわち、試片を片面から赤外線などで局部加熱すると、図 22(b)に示すように、加熱された部分のひずみ回復力だけで、両側が引張られ加熱部を内側にして曲げられる¹⁰⁾。加熱幅や加熱箇所を変えることにより V, W, U などの安定形状を得ることができる。

(c) 局部加熱深絞り：プラスチックは冷間あるいは一様加熱では成形品形状の不安定（ひずみ回復）、局部薄肉化、白化、破断などの問題を生じ深絞りすることはできない。しかしブランクの縮みフランジ変形抵抗を軽減するフランジ部のみの局部加熱を適用すると、比較的生産性よく良好な深絞りカップ成形品を得ることができる³³⁾⁴⁰⁾。筆者らはこれを P. T. D. (Plastics Thermo-Drawing) 法と呼んでいる³⁴⁾。装置の模式および成形例を図 23 に示す。たとえばポリプロピレンおよび CaCO₃ 増量材入りポリプロピレンの薄板は 120~140°C、ガラス長繊維強化ポリプロピレン基スタンプパルシートは 140~160°C で、直径 30~100 mm のカップに絞り比 3.0 以上までも深絞りできることを確認した。他種のプラスチック板およびその複合材に対しても可能である。

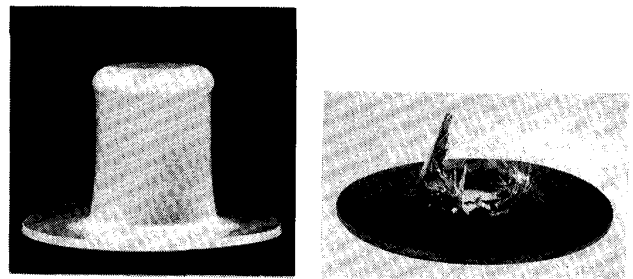
5. おわりに

プラスチックは塑性を持たないので金属のように高速の冷間塑性加工法をそのまま適用して製品を得ることは、現状ではかなり難しい。むしろ優れた流動性または変形特性を利用して、原材料から一気に製品形状をつくり込むほうが合理的であり、各種の方法が開発されている。しかし高温であるいは局部加熱による擬似冷間であれば、塑性加工の技術がかなり利用できる。

とくに近年は耐熱性や強度に優れた高性能プラスチックとその複合材料の開発が盛んであり、既存のプラスチック成形加工法では、機械容量や精度不足また成形品の形状不良や内部欠陥などの問題が顕在化しつつある。その解決にはプレスや圧延機などの塑性加工機械を基本



(a) P.T.D. プレス方式



(b) 一様加熱(150°C)で見られる深絞り不良
 左: PP(t2)の白化および壁部伸び, D.R. = 2.46
 右: 40%ガラス長繊維強化 PP(t2)の破断, D.R. = 2.77



(c) フランジ加熱(150°C 3min)絞りによる
 40%ガラス長繊維強化 PP(t2)のカップ(D.R. = 3.38)

図 23 プラスチック材料薄板の域差加熱深絞り

とした成形加工法がいっそう必要となろう。

そのほかプラスチックの減衰能を利用した制振・防振鋼板, 化学的環境安定性を利用した各種被覆鋼板やラミネート鋼管などの製造には, 塑性加工技術が役立っている。さらに鋼などの金属との複合化によって, プラスチックの持たない塑性とくに加工形状の安定性が付与される可能性も大きく, そうなると塑性加工技術は依然として重用されることになる。

塑性加工の手法がそのままプラスチックの性質改善に役立つ可能性も大いにある。すでに超延伸(単軸引張変形)繊維, 超延伸(平面ひずみ)フィルム, 二軸圧縮変形有機ガラスなどの例に見られるように, 大幅に強度改善がなされ実用されている。熱間圧延により強化をはかった試み³⁵⁾もある。筆者らは冷間圧延と急速熱処理を組み合わせた方法³⁶⁾³⁷⁾で, 著しく強化された薄板をつくるのに成功している。

プラスチックがひずみ回復する性質を持つことを逆用して, 塑性加工と熱処理を組み合わせる熱にตอบสนองの感温変形要素または形状記憶部品をも作ることもできる³⁸⁾³⁹⁾。そのほかプラスチックと塑性加工技術の関わりによって付加価値の高い製品がまだ幾つも生み出されるであろう。今後に期待したい。

終わりに, この小文のまとめの機会を与えて下さった東京大学生産技術研究所・木内学教授に感謝する。本稿が読者の今後のために幾分でも示唆するところがあれば幸いである。

文 献

- 1) 大蔵明光, 福田 博, 香川 豊, 西 敏夫: 複合材料 (1984), p. 6 [東京大学出版会]
- 2) (社)日本航空宇宙工業会資料
- 3) 町田輝史: 塑性と加工, **21** (1980), p. 1033
- 4) 牧野内昭武, 石黒省爾: 第 25 回塑性加工連合講演論文集 (1974), p. 399
- 5) 山口章三郎: 塑性と加工, **11** (1970), p. 591
- 6) 前田禎三: 精密機械, **44** (1978) 4, p. 476
- 7) 牧野内昭武, 岡井紀彦, 金網久明, 中山和郎: 第 29 回塑性加工連合講演論文集 (1978), p. 408
- 8) 牧野内昭武: 塑性と加工, **20** (1979), p. 618
- 9) 町田輝史, 中川威雄, 岡井紀彦: 同上, p. 902
- 10) 町田輝史, 岡井紀彦: 塑性と加工, **21** (1980), p. 152
- 11) 町田輝史, 岡井紀彦: 高分子論文集, **38** (1981) 5, p. 331
- 12) 町田輝史, 岡井紀彦: 塑性と加工, **21** (1980), p. 1102
- 13) たとえば成沢郁夫: 日本金属学会会報, **27** (1988), p. 650
- 14) 前田禎三, 松岡信一: 塑性と加工, **21** (1980), p. 1057
- 15) 松岡信一: 塑性と加工, **27** (1986), p. 1159
- 16) 町田輝史: 塑性と加工, **24** (1983), p. 1140
- 17) 池田輝昭, 塚本 勝: 塑性と加工, **25** (1984), p. 1094
- 18) T. IKEDA: Techno Japan, **10** (1986), p. 31
- 19) 瀬川浄一郎: 塑性と加工, **21** (1980), p. 1085
- 20) たとえば大久保稔: 合成樹脂, **35** (1989) 3, p. 2, V. WIGOTSKY: *Plastics Engineering* (1985 年 1 月), p. 37, E. P. GAUDETTE: *SPI National Plastics Exposition Conference, Chicago* (1985 年 6 月)
- 21) 吉井康一, 服部成亨, 恵比野美明, 山田利男: 昭和 59 年塑性加工春季講演論文集 (1984), p. 787
- 22) 保坂邦彦: 塑性と加工, **21** (1980), p. 1071
- 23) 宅間靖雄: 同上, p. 1075
- 24) M. BREZINA and Y. GUANG-FU: *SPE, 41th Ann. Tech. Papers* (1983), p. 859
- 25) 大柳 康, 山口章三郎, 佐藤貞雄, 新田宏之, 伊藤英也, 奥山俊郎: 塑性と加工, **21** (1980), p. 1090
- 26) A. BROCKSCHMIDT: *Plastics Technology* (1982 年 6 月), p. 59
- 27) F. J. LAVOIE: *Machine Design*, **11** (1969), p. 82
- 28) M. A. SCHAPER and M. A. CRONENBERGER: *Modern Plastics International* (1977 年 4 月), p. 54
- 29) G. D. STEPHENSON: *SPI National Plastics Exposition Conference, Chicago* (1985 年 6 月)
- 30) T. MACHIDA, T. NAKAGAWA and T. OKAI: *Annals CIRP*, **29** (1980) 1, p. 179
- 31) 町田輝史: 塑性と加工, **24** (1983), p. 1093
- 32) 中川威雄, 鈴木 清, 町田輝史: 塑性と加工, **16** (1975), p. 379
- 33) 町田輝史, 岡井紀彦, 増山哲男, 小澤利彰: 塑性と加工, **29** (1988), p. 286
- 34) 町田輝史, 岡井紀彦, 佐野村幸夫, 川嶋裕司, 田中寿弘: 35 回合成樹脂講演 (1989), p. 39 および第 40 回塑性加工連合講演論文集 (1989), p. 301
- 35) 東田康宏, 菊間敏夫, 川並高雄: 第 38 回塑性加工連合講演論文集 (1987), p. 145
- 36) 町田輝史, 岡井紀彦, 浜吉福治, 荒川泰治: 塑性と加工, **25** (1984), p. 206
- 37) T. MACHIDA, T. OKAI and F. HAMAYOSHI: *4th Int. Conf., Mech. Behavior of Materials* (1983), p. 993
- 38) 岡井紀彦: 名古屋大学博士論文 (1987), p. 79
- 39) 町田輝史, 岡井紀彦, 要田昌江: 塑性と加工, **25** (1984), p. 45
- 40) T. MACHIDA and D. LEE: *Polymer Engineering and Science*, **28** (1988) 7, p. 405