

熱可塑性樹脂板の非軟化曲げ技術

当社の「熱可塑性樹脂板の非軟化曲げ技術」では、樹脂板の表面処理の性能を維持したまま曲げることができます。また、射出成形と比較して、成形時のヒケやウェルドといった軟化曲げに伴う表面の歪みがほとんど発生しないため、仕上がりが美しく歩留りの向上が期待できます。

樹脂板 x 切削加工

私たちは樹脂切削加工を中心に、あらゆるニーズの「最高点」に挑戦します。



 **TAIYO SEIKO**

太陽精工株式会社

<https://taiyo-seiko.co.jp/>

内容

プラスチックの略号一覧.....	3
1. はじめに.....	5
2. プラスチックの分類.....	6
2-1 耐熱性による分類.....	6
2-2 結晶性による分類.....	8
3. 熱可塑性プラスチックの加熱.....	10
4. 熱可塑性プラスチックの曲げ加工.....	12
5. PCの冷間曲げ.....	13
6. PC冷間曲げのひずみ回復.....	14
7. PC非軟化曲げ技術.....	15
8. アクリル非軟化曲げ技術.....	16
9. 非軟化曲げの加工例.....	17
9-1 車載ナビパネル.....	17
9-2 導光板.....	17
9-3 ハーフミラー板.....	18

プラスチックの略号一覧

結晶性プラスチック

汎用プラスチック

- ・ PE : ポリエチレン
- ・ PP : ポリプロピレン

汎用エンブラ

- ・ PA 6 : ポリアミド 6
 - ・ PA 6 6 : ポリアミド 6 6
 - ・ POM : ポリアセタール
 - ・ PBT : ポリブチレンテレフタレート
 - ・ PET : ポリエチレンテレフタレート
- #### スーパーエンブラ
- ・ PPS : ポリフェニレンスルフィド
 - ・ PEEK : ポリエーテルエーテルケトン
 - ・ LCP : 液晶ポリマー
 - ・ PI : ポリイミド
 - ・ PFA, EPA : フッ素樹脂

非晶性プラスチック

汎用プラスチック

- ・ PVC : ポリ塩化ビニル
- ・ PS : ポリスチレン
- ・ SAN : アクリロニトリルスチレン樹脂
- ・ ABS : ABS 樹脂

(アクリロニトリル (Acrylonitrile), ブタジエン (Butadiene),
スチレン (Styrene)の共重合合成樹脂)

- ・ PMMA : メタクリル樹脂 (アクリル)
- #### 汎用エンブラ
- ・ PC : ポリカーボネート
 - ・ mPPE : 変性ポリフェニレンエーテル
- #### スーパーエンブラ

- ・ PAR : ポリアリレート
- ・ PSU : ポリスルホン
- ・ PES : ポリエーテルスルホン
- ・ PAI : ポリアミドイミド
- ・ PEI : ポリエーテルイミド

1. はじめに

合成樹脂，すなわちプラスチック（plastics）の語源はplasticity，日本語では可塑性という言葉です。可塑性とは任意の形に加工・成形できる性質のことを言います。

プラスチックは加熱によって可塑性を示す熱可塑性プラスチックと，いったん加熱し硬化後は可塑性を示さない熱硬化性プラスチックに分類されます。

本稿では前者の熱可塑性プラスチックをガラス転移点より低い温度で曲げ加工する当社独自の技術「非軟化曲げ」について解説します。

本稿の構成としては，まずプラスチックの分類について解説し，次に熱可塑性プラスチック材料の一般的な曲げのメカニズムについて記述します。そして「非軟化曲げ」が可能かつ有効な理由について解説した後，実際に曲げ加工した当社事例について公開いたします。

2. プラスチックの分類

プラスチックは合成樹脂ともいわれ、化学反応によって作られる人工の高分子有機化合物です。プラスチックの原料は一般的に石油が用いられます。使用する原料とその配合、さらには分子構造によってさまざまな特性を持たせることができます。

現在我々が目にするプラスチックは、その語源通り加熱によって可塑性を示す熱可塑性プラスチックだけではなく、加熱・硬化後に可塑性を示さない熱硬化性プラスチックも含んだ概念となっています。

熱可塑性プラスチックについては結晶化を生じる結晶性プラスチックと結晶化を生じない非晶性プラスチックに分類されます。

2-1 耐熱性による分類

熱を加えたときに軟化するか、硬化するかで、まずプラスチックを大きく分類できます。前者を熱可塑性プラスチック、後者を熱硬化性プラスチックといいます。

熱可塑性プラスチックは熱で溶融して冷却すると固化するプラスチックで、イメージとしてはチョコレートのような温度依存性を持ちます。熱硬化性プラスチックは熱を加えると低分子のものが反応し、固化したものは熱を加えても溶融しないプラスチックでイメージとしてはクッキーのような温度依存性を持ちます。

熱可塑性プラスチックはさらに耐熱性によって汎用プラスチック（耐熱温度約60～100℃）とエンジニアプラスチック（エンプラ、耐熱温度約100℃～）に分けられます。汎用プラスチックはその名の通り比較的安価で、加工しやすい一般的なプラスチックです。エンプラは機械的強度や耐熱に優れ、主に高性能の求められる工業用部品に使用されるプラスチックです。

エンプラはさらに汎用エンプラ（耐熱温度約100～150℃）、スーパーエンプラ（耐熱温度約150～350℃）に分類されます。

以上を図にまとめると**Fig2.1**のようになります。

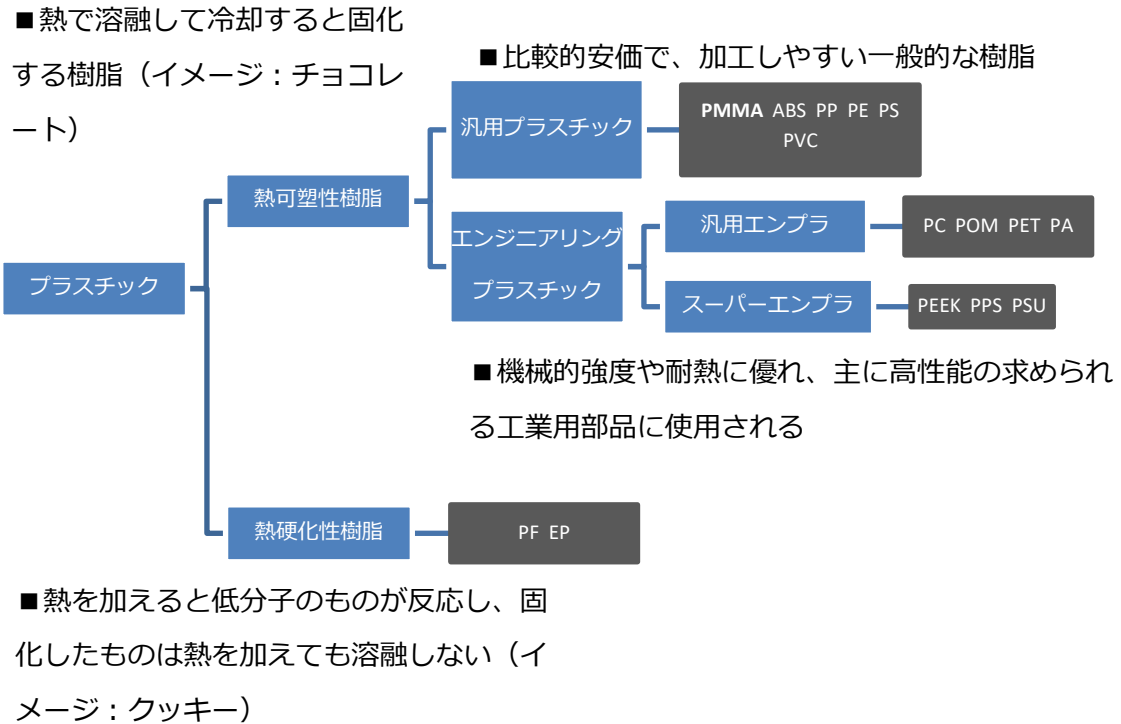


Fig.2.1 プラスチックの耐熱性による分類

2-2 結晶性による分類

プラスチックの分類の方法として結晶性によるものもよく使われます。溶融状態から冷却し固化する過程で部分的に分子が規則的に結晶化し結晶部を形成するプラスチックのことを結晶性プラスチックといいます。一方、固化する過程で結晶部が形成されないプラスチックのことを非晶性プラスチックといいます。この様子を模式的に描いたのがFig.2.2とFig.2.3です。

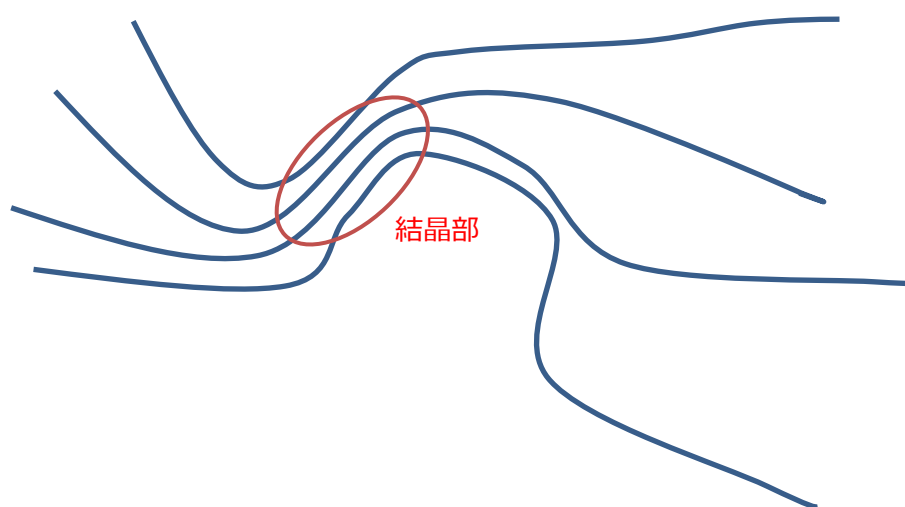


Fig.2.2 結晶性プラスチック

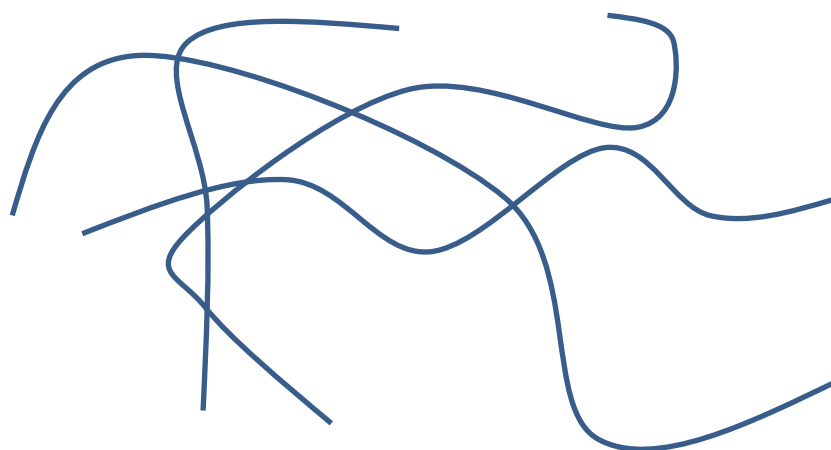


Fig.2.3 非晶性プラスチック

非晶性プラスチックは加熱・冷却過程での膨張・収縮が結晶性プラスチックに比べてなだらかな変化を示すことが知られています。横軸に温度，縦軸に弾性率（変形のしにくさを

表します) を取り, 結晶性のナイロン6と非晶性のポリカーボネート(PC)のデータをプロットすると**Fig.2.4**のようになります。

ナイロン6の場合は常温から加熱した場合, 非晶性の部分の運動性が大きくなるガラス転移点(約50℃)を越えた後も結晶部が維持されある程度の弾性率は残存します。さらに加熱すると結晶部も壊れ弾性率は0に向かいます。この温度(225℃)を融点 T_m といいます。

PCの場合は常温から加熱していくとガラス転移点 T_g (約150℃)を境に弾性率がほぼ0まで下がり軟化します。

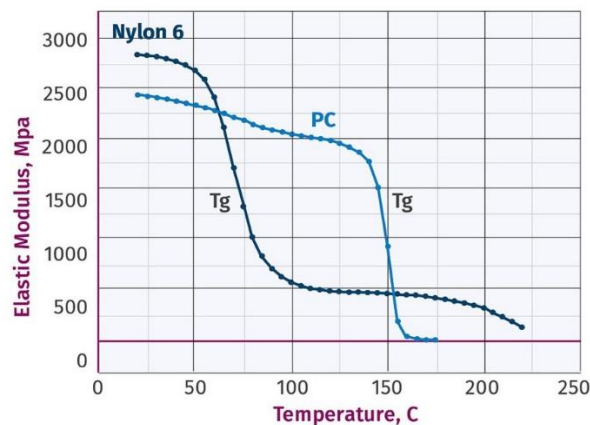


Fig.2.4 PCとナイロン6の弾性率の温度依存性¹

プラスチックを結晶性に基づいて分類した表を下に示します(**Fig.2.5**)。ただし非晶性プラスチックであっても処理方法次第で結晶化することができる場合もあります。²

	汎用プラスチック	汎用エンブラ	スーパーエンブラ
結晶性プラスチック	PE, PP	PA6, PA66, POM, PBT, PET	PPS, PEEK, LCP, PI, PFA, EPA
非晶性プラスチック	PVC, PS, SAN, PMMA, ABS	PC, mPPE	PAR, PSU, PES, PAI, PEI

Fig.2.5 プラスチックの耐熱性・結晶性による分類マトリックス

¹ <https://www.ptonline.com/articles/the-effects-of-temperature>

² 畠山・伊藤・金網:ポリカーボネートの有機溶媒による結晶化, 高分子論文集, 1974

3. 熱可塑性プラスチックの加熱

熱可塑性プラスチックを熱していくとガラス転移温度を境に様々な特性が変化します。

ガラス転移温度（ T_g ）は、ポリマー分子の相対的な位置は変化しないが分子主鎖が回転や振動（マイクロブラウン運動）を始める温度です。この温度以下ではガラス状態（液体状態の分子の無秩序な配列がそのままあるいは部分的に保持された構造をとった状態）に凍結するのでガラス転移温度と称しています。

非晶性プラスチックは T_g 以下では固化状態になりますが、必ずしもガラスのように脆くなるわけではなく延性を示す材料もあります。比容積、線膨張係数、比熱、熱伝導率などの温度特性は T_g が変曲点になります。また、射出成形では T_g は固化温度の目安になります。

一方、結晶性プラスチックにおいても T_g は存在しますが、成形上では結晶融点や結晶化温度のほうが重要な意味を持ちます³。

なお、工業的には、プラスチックが急速に軟化し始める温度の目安である荷重たわみ温度やビカット軟化温度が短期的な耐熱性を示す上で重要となります。それぞれの測定法は下図のようにJISで定められています。

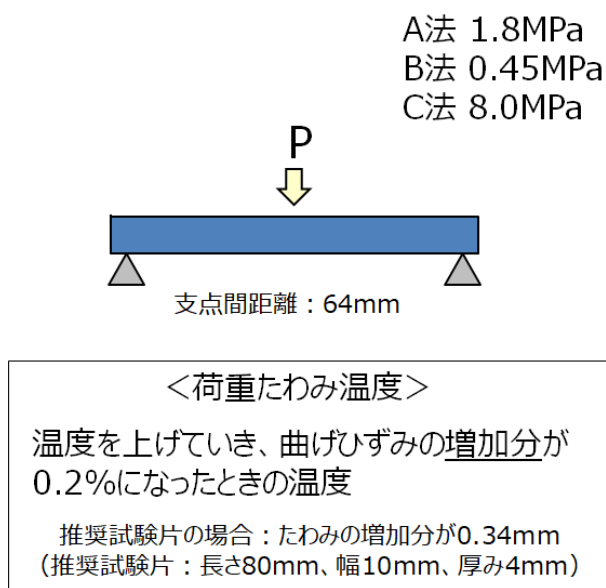
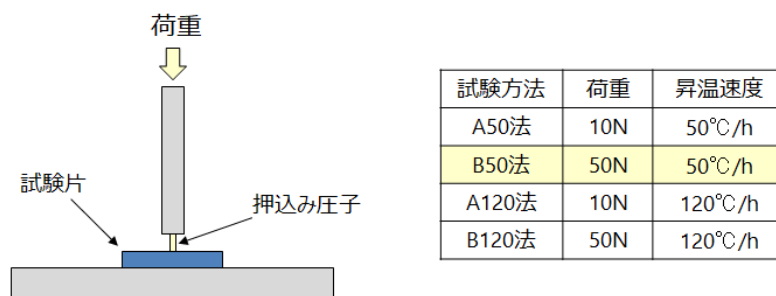


Fig.3.1 荷重たわみ温度の測定方法（ISO 75（JIS K7191））⁴

³ 本間誠一：射出成形特性を活かすプラスチック製品設計法，日刊工業新聞社，2011

⁴ <https://seihin-sekkei.com/plastic-design/temperature-of-deflection-under-load/>



＜ビカット軟化温度（VST）＞
 選択した試験方法において、押し込み圧子が
 試験片に1mm侵入するときの温度

Fig.3.2 ビカット軟化温度の測定方法（ISO 306（JIS K7206））⁵

⁵ <https://seihin-sekkei.com/plastic-design/vicat-softening-temperature/>

4. 熱可塑性プラスチックの曲げ加工

熱可塑性プラスチックは加熱することで弾性率が減少し変形させやすくなります。この性質を利用して、熱可塑性プラスチック材料を加熱し曲げ加工することが行われてきました。薄い板材、シートなどを加熱し、軟化させて、外力を加えて成形する方法であり、熱成形（Thermoforming）とも言われます。

曲げ加工には、パイプヒータを当ててそのラインに沿って折り曲げる「直線曲げ加工」（Fig.4.1）や、炉に入れて加熱軟化させてから型にはめて成形する「R曲げ加工」（Fig.4.2）があります。

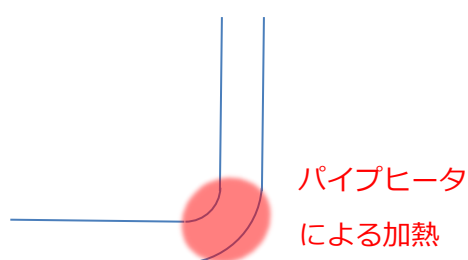


Fig.4.1. 直線曲げ加工（断面）

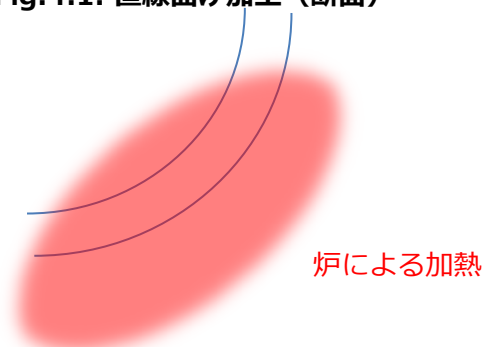


Fig.4.2. R曲げ加工（断面）

しかしこの軟化曲げの方法では加工条件が適切でないと表面が軟化しすぎてくもりや型当たり跡が生じたり、熱収縮による形状異常を来したりしてしまいます。特にR曲げは加熱範囲が広いいため熱収縮により加熱後の寸法が直線曲げよりも大きく変化します。

一方、プラスチックの種類によっては常温で曲げてもある程度の曲げ角度までなら破断しないものもあり、その場合は熱をかけずにすなわち軟化させずに曲げ加工ができる可能性があります。このいわゆる冷間曲げについては次章で詳説します。

5. PCの冷間曲げ

ポリカーボネイト（PC）は汎用エンブラに分類される熱可塑性プラスチックで透明性・耐衝撃性・耐熱性・難燃性・寸法安定性などにおいて高い性能を示します。

ビスフェノールAとホスゲン（塩化カルボニル）を界面重縮合でポリマー化して生成します（Fig.5.1）。また、ホスゲンの代わりにジフェニルカーボネートを用いる場合は、エステル交換による重合で合成されます。

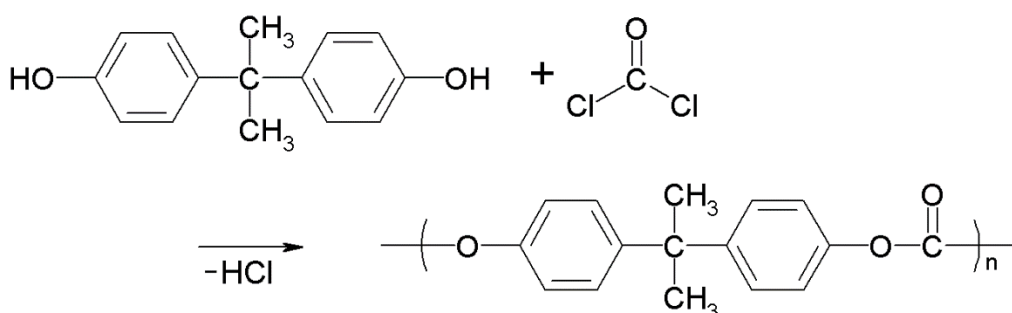


Fig.5.1 ビスフェノールAとホスゲンからのPCの生成

PCは上記に加え、常温でも曲げ角度が90°付近まで破断に耐えられるという特長を持ちます。このため冷間曲げ加工が可能な材料として知られています。冷間曲げの場合、非加熱のため気泡発生や変形が起こらず、表面印刷を損なうことなく加工することが可能となります。

一方で、弾性変形の瞬間的回復によるスプリングバック現象が発生するのとともに、長時間にわたるひずみ回復が起こります。後者は冷間曲げ加工品の寸法と形状の安定性に関係するので、そのコントロールはとても重要です。これについては次章にて詳しく述べます。

6. PC 冷間曲げのひずみ回復

プラスチックの粘弾性的力学挙動の説明に、Fig.6.1に示すマクスウェル要素 とフォクト要素を直列に連結した四要素モデルがよく用いられます。

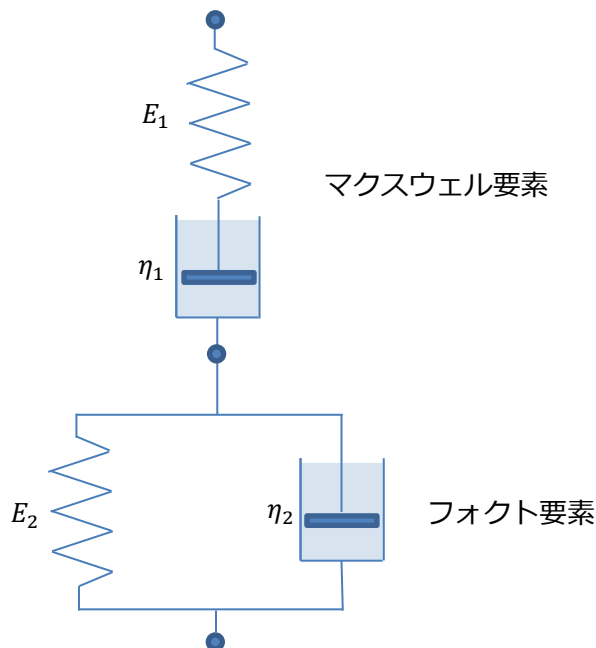


Fig.6.1 プラスチックの粘弾性的力学挙動の四要素モデル

要素 E_1 は瞬間弾性に対応し、要素 η_1 は粘性を表します。 E_2 と η_2 からなるフォクト要素は遅延弾性に対応し、このうち粘性項 η_2 はガラス転移点 T_g 以上の温度領域で特に目立ってきます。 T_g 以下の冷間加工でも η_2 は凍結状態に近いものの、 T_g に近い温度では多少の変形は可能です。

加工力が除かれると T_g 以下の冷間加工では主として要素 E_1 に蓄えられた弾性変形が瞬間的に回復（スプリングバック）されます。一方、この際、フォクト要素に蓄えられている変形は弾性要素 E_2 によって回復されますが、粘性項 η_2 （および摩擦要素）の強い抵抗によって長時間にわたって徐々にひずみ回復が起きます。 T_g 以下で冷間加工された加工品は T_g 以上の温度環境に置くと粘性項 η_2 の抵抗が極めて弱くなり、弾性要素 E_2 によって短時間の内に原形に近い寸法と形状に戻ってしまいます⁶。

さて、加工品の安定性にとって不都合な冷間加工のこのような特性の発現を抑制するにはどうしたらよいでしょうか。次章ではその解決策として当社が考案した「非軟化曲げ」について述べます。

⁶ 前田禎三：プラスチックの塑性加工品の精度，精密機械44巻4号，1977

7. PC 非軟化曲げ技術

前章のプラスチックの粘弾性的力学モデルを使って、冷間曲げの課題であるひずみ回復の低減方法について考えてみましょう。

もう一度、曲げ加工の工程に沿って時系列で考察します。

冷間曲げ加工の際、加工力による仕事量は、弾性エネルギーとして弾性要素 E_1 と E_2 に蓄えられるのと同時に粘性要素 η_1 と η_2 （および摩擦要素）に吸収されます。ここで除荷してしまうと、常温では、まず主として要素 E_1 に蓄えられた弾性変形が瞬時的に回復（スプリングバック）されます。一方、フォクト要素に蓄えられている変形は弾性要素 E_2 によって回復されますが、粘性項 η_2 （および摩擦要素）の強い抵抗によって長時間にわたって徐々にひずみ回復が起きるのは前章で示した通りです。

では、もし除荷を遅らせ加圧し続けるとどうなるでしょうか。要素 E_1 のひずみは間もなく粘性要素 η_1 とフォクト要素（ E_2 と η_2 ）のひずみに転化されていくのが**Fig.6.1**からわかると思います。その後、フォクト要素には弾性要素 E_2 が並列で入っていますからいったん蓄えられたひずみは徐々に回復し、結局は粘性要素 η_1 のひずみに転化されます。ただしこれを常温で行うとなるとフォクト要素のひずみ回復を延々と待つこととなります。これを待たずに除荷すると、フォクト要素の長時間にわたるひずみ回復により加工品の安定性が損なわれてしまいます。

そこで、加圧の継続とともに、加温することで粘性要素 η_2 の抵抗を弱め、フォクト要素のひずみ回復を促進することにします。すると加工で生じたひずみを、粘性要素 η_1 のひずみへの転化がスムーズに実現されるようになるのです。

以上のように加圧と加温を時系列でコントロールすることで、冷間加工と熱間加工の良い所取りをするのが当社の開発した「非軟化曲げ技術」です。

当社においては、上記のような考察を基に実験を繰り返し、温度条件・加圧方法をコントロールすることで、気泡発生や変形が起こりにくく、表面印刷を損なうことなく加工できる非軟化曲げ加工を実現することに成功しました。

8. アクリル非軟化曲げ技術

アクリルはポリメタクリル酸メチル（polymethylmethacrylate, PMMA）の一般的呼称です。Fig.8.1のようにメタクリル酸メチルがビニル重合したものです。

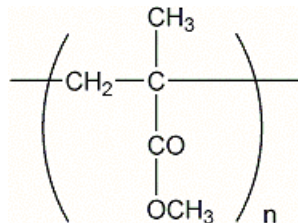


Fig.8.1 アクリルの構造式

アクリルは透明度がガラスよりも高く、また耐候性、硬度が高いのが特徴です。

一方で、アクリルはガラス転移点が100℃前後で130℃を超える高耐熱PMMA⁷も製品化されていますが、PCに比べると耐熱性、耐衝撃性などは劣るので、非軟化曲げ加工における温度管理や加圧方法の難度はより高くなります。

当社では、実験を繰り返し、アクリルの非軟化曲げに成功しています。加工品の安定性も経験則から再現性をもって担保しており、さらにPC、PMMAの複層板の非軟化曲げにも成功しております（加工事例は次章参照）。

⁷ <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/news/18/03306/>

9.非軟化曲げの加工例

本章では、当社がこれまでに非軟化曲げ加工に成功した例を示します。

9-1 車載ナビパネル

ハードコート付き複層版にシルクスクリーン印刷を施し、縦横両方向に曲げを行っています。透過、IR印刷等にも対応し、背後に光源を置くことで多彩な表現が得られます。



Fig.9.1.非軟化曲げ加工による車載ナビパネル

曲面形状：3D形状

材料：複層板（PC+PMMA）, ハードコート付き

印刷：シルクスクリーン印刷

9-2 導光板

ハードコート付き複層板にインクジェット印刷を施したのち曲げを行い導光板を作成しました。消灯時はほとんどクリアですが、光源点灯時は曲げに従って製品形状がはっきりと浮かび上がります。

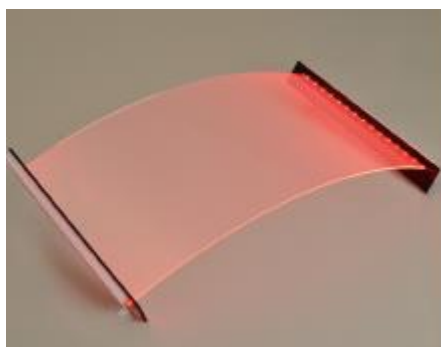


Fig.9.2.非軟化曲げ加工による導光板

曲面形状：2D形状

材料：複層板（PC+PMMA）, ハードコート付き

印刷：インクジェット印刷

9-3 ハーフミラー板

金属蒸着板の場合でも、蒸着を維持したまま曲げが可能です。曲げに伴う曇りやクラックもなく、元板の蒸着のまま歪みがない美しい鏡面となります。



Fig.9.3.非軟化曲げ加工によるハーフミラー板

曲面形状：3D形状

材料：金属蒸着板（PMMA）

印刷：シルクスクリーン印刷