

白熱光ビームによる曲げ加工の試み

An application of White Light Beam to Bending Process

増 沢 隆 久*

Takahisa MASUZAWA

未利用の加工エネルギー源として白熱光ビームを取り上げ、その特徴を生かした
熱可塑性プラスチックの曲げ加工への応用について実験結果をもとに解説した

ま え が き

光の持つエネルギーを加工に利用することは、太陽エネルギーの利用という形で古くから試みられてきており、現在またエネルギー危機の声により改めて見直されようとしている。しかし、太陽という(地球から見て)動く光源を利用するということはそれ自体多くの問題点を持つもので、まだ十分な見通しは得られていない。

一方新しい人工の光源としてレーザーが開発され、その大パワー化の進展と共に加工にも利用されるようになった。このレーザー加工は、レーザー光の持つ優れた性質を生かし、マイクロ加工、切断加工などで新分野を開きつつある。しかし、光のエネルギーを熱源として利用する限りにおいては、コヒーレント性、輻射角などの点でレーザー光ほどの質の良さが必要でないことも多いはずである。

そこで改めて各種の光源を加工の熱源という観点で再検討してみると、いくつか使用可能と思われるものがあることがわかる。中でも古くから照明用として広く用いられている白熱電球類はいろいろな点で有望な素質を持っていると考えられる。

そこで光ビーム(レーザー光もこの範疇に属する)による加工の一方法として白熱電球を用いた加工について、応用の可能性を深ってみた。^{1), 2)}

実 験 の 概 要

光ビームによる熱加工を行うには、光源、集光装置、集束装置が必要である。

光源からの光は集光、集束して最終的に光の集中した高パワー密度の点を実現しなければならない。そのため、集光、集束系にあまり特殊なものを用いないとすれば光源には単純な形状のものが必要となる。

最も単純な方式としては点光源を用いて一点に集束することが考えられるが、レーザー加工以上の応用範囲も無く、パワー密度も小さいものしか得られないのであまり利用価値が無さそうである。次に単純なものとして直線

状の光源が考えられる。これはパワーの大きいものが容易に入手でき、しかも集束されたビームも直線状(ビーム進行方向に対しては垂直)となり、レーザーとは異なった応用範囲も考えられるため、これを採用することとした。

直線状フィラメントを持つ白熱電球で、国産最大のパワーが得られる東芝の投光用ハロゲン電球J210V1500Wを用いることにしたが、それでも集光点のパワー密度は金属加工を行うほどには高くできないため、プラスチックの曲げ加工を行うこととした。被加工材としては機械的性質が優れており、しかも曲げ加工ににくいアクリルの板材を取り上げ、直線状に集束されたビームを利用した曲げ加工を行い、本加工法での加工特性を調べた。

アクリル板の加工特性

1. 加工装置

加工装置の略図を図1に外観を図2に示す。

光源P(紙面に垂直な直線状、長さ約170mm)から出た光は放物面鏡M(焦点距離50mm)により平行光(光路の紙面への射影のみが平行)となり、レンズ群 $L_1 \sim L_3$ により焦点Fに集束される。集束された像は光源Pと同様ほぼ紙面に垂直な直線状となる。シリンダカルレンズを用いれば像の性質は向上すると思われるが、加熱能力を重視し、普通の形状(円形)の非球面レンズ(日本光学および富士写真光機製)を用いた。

工作物Wは加重装置Bに取り付け、焦点位置にセットし、錘により一定トルクの加わる円板から突出した腕により曲げ荷重を与えるようにした。荷重は約 $0.78 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ とした。工作物としては三菱レイヨンのアクリライトを用いた。

2. 実験結果

まず実用性を確める意味で、どの程度の時間で曲げ加工を行えるかを、板厚、板幅、アクリル材の色、照射方向、工作物セット位置などを変えて調べた。そして各条件における加工後のアクリル板の性状について検討を行った。

* 東京大学生産技術研究所 第2部

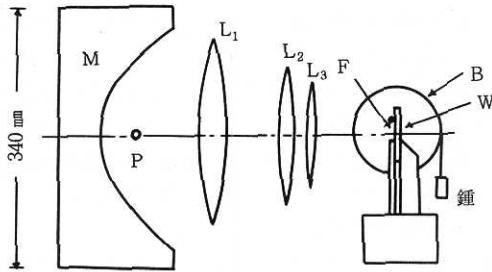


図1 光ビーム加工装置原理図

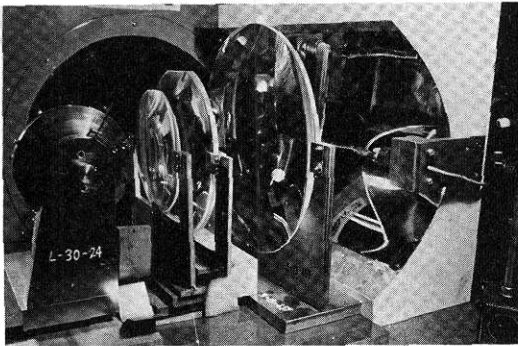


図2 装置の外観
(図1と反対の側から見たところ)

2.1 加工時間

はじめに、工作物寸法が厚さ2mm、幅10mmの場合について光を照射し始めてから曲げが完了するまでの時間を各条件について測定した。曲げ角は約102°とした。

2.1.1 アクリル材の色

アクリル材はさまざまな色のものが市販されているが、この色が光の吸収効率に影響するため、加工時間も大きく影響される。特に無色透明のものは全く加工できなかった。

紫色透明のもの、黒色不透明のもの、無色透明のものにラッカーで黒色に着色したものの三種について加工時間を測定した結果は表1のようになった。ただしミラー面から工作物のセット位置までの距離は383mmである。

表1 工作物の色と加工時間の関係 (工作物: 厚さ2mm, 幅10mm)

工作物の色	紫 (透明)	黒 (不透明)	無色透明	
			表面着色	裏面着色
加工時間 sec	33	11	13	13

表中に表面着色、裏面着色とあるのは無色透明のアクリル板に着色して照射する時、図3に示すように二通りの方法があるので、これを区別したものである。

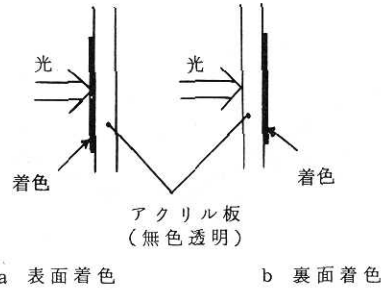


図3 着色面と照射光の関係

このように暗色のものほど加工時間が短くなる。着色すると無色のアクリル板でも加工可能となるが、着色面が表でも裏でも加工時間には大差が無く、着色の濃さが強い影響を及ぼすようである。

2.1.2 照射方向

本加工法では曲げる向きに対し光の照射方向が二通りある。図4 aのように曲げて外になる側を照射する場合を外側照射、bのように曲げて内になる側を照射する場合を内側照射とし、それぞれについて黒色および紫色の材料で加工時間を測定した。結果を表2に示す。

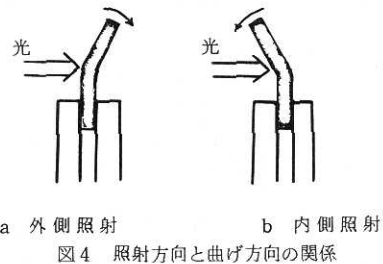


表2 照射方向による加工時間の違い (工作物: 厚さ2mm幅10mm, セット位置: ミラー面より383mm)

工作物の色	黒 (不透明)		紫 (透明)	
	外側	内側	外側	内側
加工時間 sec	11	11	33	34

このように照射方向はあまり加工時間に影響しないが、他の実験結果などもあわせて見ると内側照射の方がやや長い時間を要するようである。

2.1.3 工作物セット位置

焦点に対しどの位置に工作物をセットするかで加工時間が異なることは当然予想される。そこで工作物のセット位置を変えて加工時間を測定した。ただし、集光、集束系の精度による制限から明確な焦点位置が確認できなかったため、セット位置はミラー面からの距離で表し、光の最も集中する点の近傍について測定を行った。

結果を図5に示す。工作物は紫色 (透明) である。

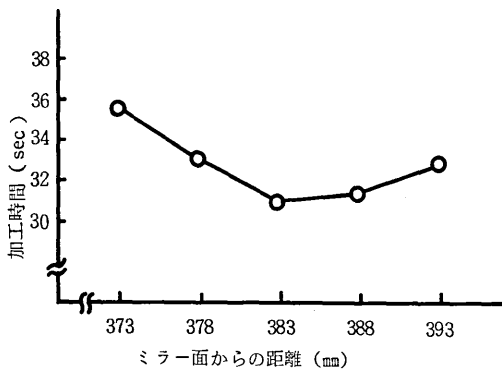


図5 工作物セット位置による加工時間の変化

図からわかるように、加工時間に関してはセット位置数mm程度の変化でも大きな影響は無い結果であった。しかし、集光、集束系の精度が高く、より細いビームに絞られた場合は影響が大きくなる可能性がある。

以下の実験は特に注記したものを除き全てミラー面から383mmの位置にセットして行ない、この位置を「焦点位置」と表すことにする。

2.1.4 板幅

工作物の板幅を変えて加工時間を調べた。紫色材料で幅10mmと幅20mmを比較すると表3のような結果となった。

表3 工作物の幅と加工時間
(紫色材料, 厚さ2mm)

工作物の幅mm	10	20
加工時間 sec	33	38

このように幅が増すと、加工時間も若干長くなる。他の材料で50mm幅のものも試みたが、それでも10mm幅に対し加工時間増加は50%程度であったから、直線状に集束されていることの効果は現れている。シリンドリカルレンズを用いるとこの差はより少なくなると思われる。

2.1.5 板厚

加工時間は工作物の厚さによっても変わると予想される。

黒色材料で厚さ1mmのものと厚さ2mmのものを比較すると表4のような結果になった。

表4 工作物の板厚による加工時間の違い (黒色, 幅10mm)

板厚 mm	1	2
加工時間 sec	3	11

このように板厚によって加工時間は大幅に変化する。しかし、これは荷重を一定としていることの影響も大きいものと思われる。

2.1.6 まとめ

加工時間についての実験結果をまとめると、1) 工作

物の色の影響が大きく、暗色ほど、また暗色に着色するほど加工時間が短縮される。2) 工作物の厚さも影響が大きく、厚いものは長時間を要する。3) 工作物の幅、照射方向、着色面(無色透明材料)、および工作物のセット位置はあまり大きく影響しない。となる。このほか、工作物を予めある程度加熱しておくこと加工時間は短縮され、200℃の予熱で加工時間は1/3ぐらいになる。

2.2 加工部の形状

本加工法によりアクリル板に曲げ加工を作った場合、加工部の形状にどのような特徴があるかを、断面の観察などにより検討した。なお、曲げられた稜の方向を幅方向、それと直角の方向を長手方向と表す。

2.2.1 長手方向の断面形状

A. 工作物の色、曲げ角、照射方向の影響

黒色および紫色材料について、曲げ角による長手方向断面形状の変化を調べた。外側照射、内側照射のそれぞれの場合の板幅中心で切断した断面の写真を図6、図7に示す。

図6が黒色材料、図7が紫色材料の場合で、それぞれaが外側照射、bが内側照射の例を示す。曲げ角はそれぞれ上から約45°、約90°、約130°である。

図から次のようなことがわかる。まず、外側照射の場合は、黒色、紫色ともに曲げにより局部の板厚減少が生じる。そしてその程度は曲げ角の増大と共に著しくなる。黒色と紫色の差は明確でない。

一方内側照射の場合は逆に曲げ部の板厚が元の板厚より増大する。特に黒色材料ではそれが著しく、しかも曲げ角の増大と共に板厚増加が進行する。

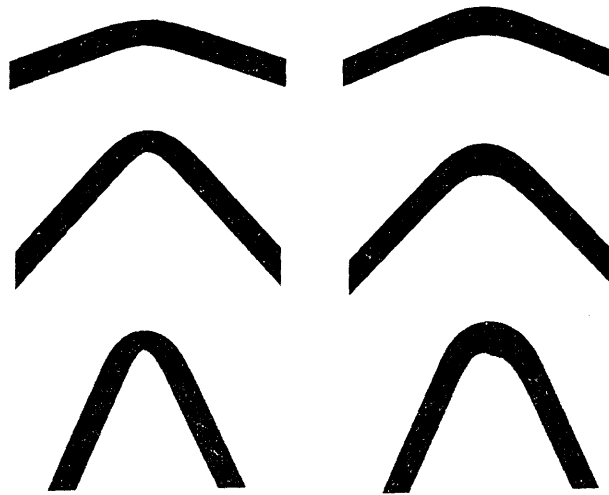
紫色材料では曲げ角の小さい時は黒色材料と同様の板厚増加が見られるが、さらに曲げていくと曲げ部内側に写真のようなしわ様の溝が発生し、中心部の板厚は増大しなくなる。

このような黒色材料と紫色材料の曲げ形状の相違は、主として両者の加熱形態の違いによるものと思われる。すなわち、黒色材料は不透明なため、照射された光のエネルギーの熱への変換はほとんどその照射された面の表層部で起こり、熱伝導により内部に向かって軟化が進むと考えられる。一方紫色材料の方は透明で、光エネルギーの吸収は厚さ方向に対しほぼ均一に起こり、従って加熱も板内での厚さ方向に一樣になされるものと考えられる。しかも外気に接する表面層はやや低い温度になるので軟化が中心部より遅くなると推察される。

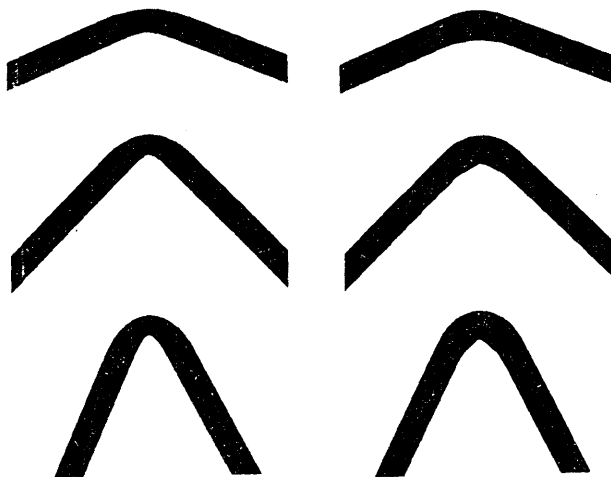
以上の理由のほか、素材そのものの添加物の違いによる機械的性質の相違も関係している可能性はある。

B. 着色面による違い

次に無色透明な材料の長手方向断面形状を調べた。無色透明材料を曲げるには着色が必要であり、片面に黒色ラッカーを光がほとんど透過しない厚さまで塗布した状



a 外側照射 b 内側照射
 図6 曲げ角，照射方向による長手方向断面形状の変化
 (黒色材料，厚さ2mm，幅10mm)



a 外側照射 b 内側照射
 図7 曲げ角，照射方向による長手方向断面形状の変化
 (紫色材料，厚さ2mm，幅10mm)

態で加工を行った。

外側照射で表面着色のものと裏面着色のもの代表例を図8に示す。aの表面着色は黒色材料の外側照射の場合とはほぼ同様，またbの裏面着色は黒色材料の内側照射の場合とはほぼ同様の断面形状となった。この結果は，表面着色した無色透明材料では黒色材料と同様表面層のみで光—熱の変換が起こることから妥当なものであるが，無色透明材料の時は外側照射でも曲げ部の板厚が増大する加工を行えるという特色がある。

C. 工作物セット位置の影響

ビームの断面パターンはミラー面からの距離により変わるのので，これが加工された形状に影響を及ぼすことが予想される。そこで，10mm間隔でミラー面からの距離を

変えて工作物をセットし，長手方向の断面形状の変化を調べた。図9にその写真を示す。工作物は紫色で，aが外側照射，bが内側照射である。

外側照射の場合は「焦点位置」から極端に離れた時に曲げ部の曲率がやや小さくなる程度で目立った変化はない。

一方内側照射の場合は図から明らかのように，Aで述べたしわ様の溝に大きな変化が見られる。すなわち，「焦点位置」より10mm以上手前(ミラー寄り)ではしわ様の溝は全く発生せず，「焦点位置」およびそれより前方にセットするとこれが現われる。しわ様の溝はセット位置がミラー面から離れるほど鋭く深くなる傾向があるが，板幅方向の長さは減少し，焦点位置では幅全体にわたって

いたのが403 mmの位置では端部で溝が消え、板幅の7~8割程の長さとなる。

このしわ様の溝は加工された曲げ部の機械的強度を減少させるので、実用に供する場合はこの溝の発生しない条件で加工を行うことが必要となる。

しわ様の溝が発生しない限りに於ては、内側照射によ

り曲げられた材料の曲げ部の曲げ(破壊)強さは、板厚増加により加工前より向上する。

D. 有色透明材料への着色効果

透明材料でも無色でなければ上述の紫色材料のようにそのまま加工できるが、表面に適当な着色を施すと、曲げ形状などを改善することが可能である。

一例として紫色材料に裏面着色(黒色)し、外側照射をしたものと、無着色で同条件のものとの比較を図10に示す。

外側照射の場合は一般に曲げ部の板厚が減少するが、図からわかるように、裏面に黒く着色しておくとも板厚減少が緩和される。これは着色により裏面からの加熱増強効果が現われたもので、前述Bの無色透明材料の場合はこの極端な例ということでもできる。適当な透過率を持った材料と適当な濃さの着色を組合せると曲げ部の板厚を任意に調節することも可能であろう。

2.2.2 幅方向の断面形状

長方形断面を持つ板材を曲げた時、曲げ部の断面形状がどのようになるかを幅方向の切断面により調べた。

まず、照射方向と工作物の色によってどのように変化するかを典型例として、厚さ2 mm、幅20 mmの黒色材料と紫色材料について、外側照射および内側照射により約

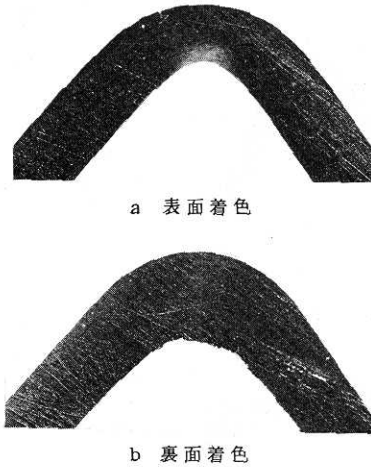


図8 着色面による曲げ部長手方向断面形状の違い (無色透明材料、厚さ2 mm、幅10 mm)

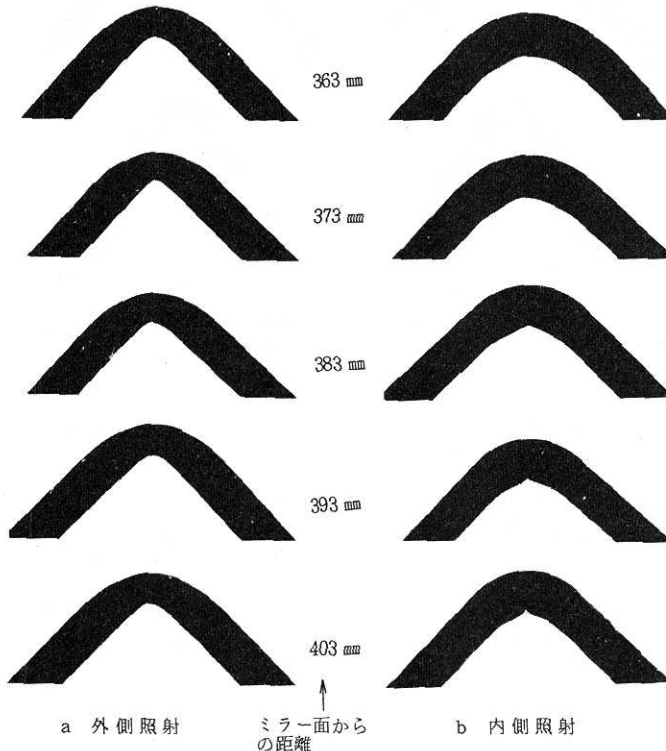


図9 工作物セット位置による長手方向断面形状の変化 (紫色材料、厚さ2 mm、幅10 mm)

90°に曲げ、曲げ部を約45°に切断した幅方向断面の写真を図11に示す。

全体的な特徴としては、内側面の板幅が増大し、両端で外側に向かってめくれ出していること、外側面も端の方が若干外側に曲がる傾向があることなどが挙げられ、いずれも内側照射の方が強く現れる。

照射方向については、外側照射では外側面が両端を除きほぼ直線を保つのに対して内側照射では若干のうねりを生じている。また内側照射では板厚そのものも不均一となる。

工作物の色による違いは内側照射によく現われており、黒色では板厚が著しく増大し中央部が特にふくらんでいるのに対し、紫色では板厚増大も少なく中央部は両端よりむしろ薄くなっている。これは前述のしわ様の溝によるものである。



図10 着色による板厚減少緩和効果
(紫色材料, 厚さ2mm,
幅10mm, 外側照射)

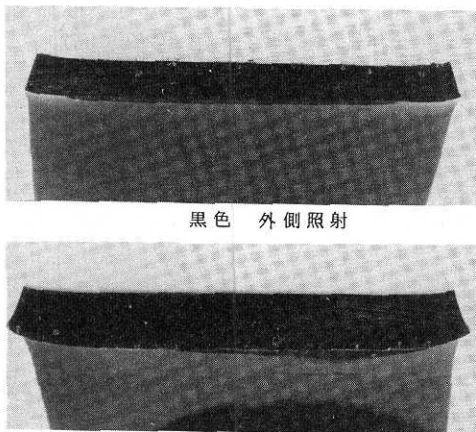
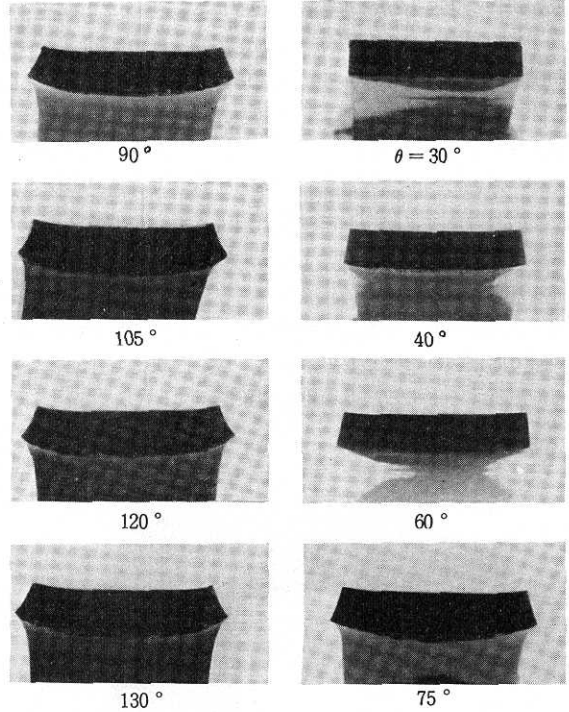


図11 曲げ部, 幅方向切断面 (厚さ2mm, 幅20mm, 曲げ角約90°, 切断角約45°)

また、板幅方向のうねりは紫色材料の方が大きい。これは黒色材料では曲がり始める段階で照射されていない側の面の近くは軟化がまだあまり進行しない状態で、直線保持の働きをするのに対し、紫色材料では全体にわたって軟化が同時に進行してしまうため形くずれしやすくなるのではないかと思われる。

次に、曲げ角による幅方向断面形状の変化を図12に示



θ : 曲げ角
切断角 = $(180^\circ - \theta) / 2$

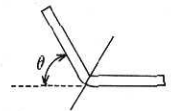
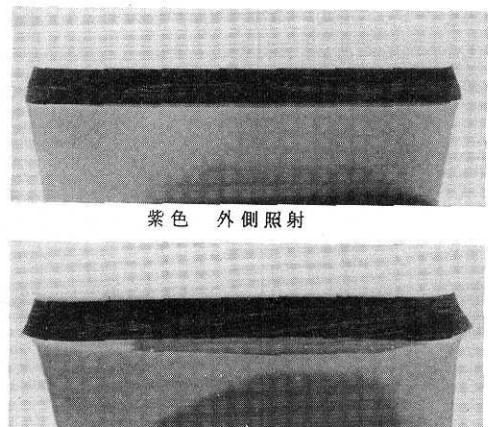


図12 曲げ角による幅方向断面形状の変化
(黒色材料, 厚さ2mm,
幅10mm, 内側照射)



す。厚さ2mm、幅10mmの黒色材料に内側照射したもので、曲げ部の両側が等角になるように切断した断面である。これで見ると曲げ角30°ぐらいでは断面形状の変化はわずかで、45°あたりから角度を増すにつれ両端のめくれ出し、板厚増加などが顕著に進行するようである。

2.2.3 その他の特徴

本加工法により曲げ加工を行った時に、上記の傾向のほか、次のような特徴が観察される。

- 1) 変形部分は数mmの範囲に限定され、他の部分では加工前の平坦度、性状がそのまま保存されている。
- 2) 外側照射により加工した場合は、内側の隅の曲率が大きい。
- 3) 黒色材料、または黒く着色した材料(有色透明材料での裏面着色は除く)では過熱による気泡発生が見られる場合がある。一例を図13に示す。
- 4) 実験した範囲ではスプリングバックはほとんど認められなかった。これは荷重が小さく、充分加熱された状態で曲げられたためと思われる。なお、軟化点付近まで再加熱するとある程度の復元現象を示す。

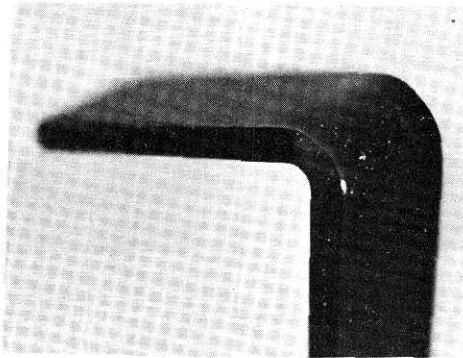


図13 過熱による気泡
(黒色材料、厚さ2mm、幅10mm外側照射)

ま と め

白熱光のビームを用いて熱可塑性プラスチックの曲げ加工を行えることがわかった。

アクリルの板材の曲げ加工では次のような特徴が見ら

れる。

- 1) 黒色不透明または暗色透明の材料はそのまま、また無色または淡色透明の材料は着色することにより曲げ加工を行うことができる。
- 2) 外側照射(暗色材料および表面着色したもの)および内側照射(裏面着色したもの)では曲げ部の板厚は減少するが、その他の場合は曲げ部の板厚が増大し、機械的強度が高まる。
- 3) 紫色(透明)材料では内側照射の時、条件により、しわ様の溝が発生し曲げ部の強度が低下する。
- 4) 板幅による加工時間の変化は少ないが板厚は厚いほど加工に長時間を要する。
- 5) 不透明または濃く着色した材料では過熱による気泡の発生が見られることがある。
- 6) 変形は局部に限定され、表材の平坦度等が良く保存される。

その他、本加工法の原理的な特徴として次のようなことが挙げられる。

- 1) 非接触かつ清浄な加熱ができる。
- 2) 簡単な装置で直線状の加熱ができる。
- 3) ガラス等で加工装置と工作物を隔離できる。
- 4) 火炎等に比べ加熱域を局限できる。
- 5) 光源(電球)が安価で交換も容易である。
- 6) 商用電源をそのまま使える。(電源装置が不要)などである。

なお、出力は光源・集光・集束系を並列に増設することにより増大させることが可能である。またパワー密度は集光・集束系の精度を高くし、焦点距離を小さくすれば増大させることができるが、フィラメントのコイル径により制限を受ける。(1977年12月8日受理)

参 考 資 料

- 1) 増沢; 光ビームによるプラスチックの加工, 第86回電気加工所研究会資料1, (1977)
- 2) 増沢, 田中, 藤野; 光ビームによるアクリル材の曲げ加工, 昭和52年度精機学会秋季大会前刷, P 209 (1977)

