

# せん断ひずみを考慮した円管の曲げ加工の研究

神奈川工科大学 システムデザイン工学科

助手 加藤俊二

(平成7年度研究開発助成AF-95018)

キーワード:せん断ひずみ、曲げ加工

## 1. まえがき

地球環境を守るという観点から、省エネルギーは極めて重要な問題となり、自動車の軽量化が求められている。自動車部品の一つであるエアークマニーホールドをアルミニウム円管を曲げ加工し、アルミニウム鋳物とろう付けした場合は従来の鋳物一体型に比べ30~40%の軽量化が可能でエンジン性能も約5%向上させることができることが知られている。一方、自動車のボディにアルミニウムスペースフレームを用いると現在のスチールモノコック構造に比べて30~40%の軽量化が可能であり燃費を向上させることが可能である。

円管の曲げ加工は古くから行われており加工法の数も多い<sup>1)</sup>。原子炉の配管ではステンレス等の加工性のよくない材料の円管が用いられ、円管の曲げ加工における加工精度の要求も厳しくなっている。円管の曲げ加工中の応力状態は加工法によって異なり、加工精度や加工限界は応力状態に依存する<sup>2)</sup>。

単軸の引張り試験では20~30%しか伸びない材料でもせん断変形では1を越えるひずみがえられる。そこで円管及び型材の成形において加工限界を向上させる成形技術の課題はせん断変形をいかにうまく利用するかという点にあり<sup>3)</sup>、その為にはせん断ひずみの測定法の確立が重要であると考えられる。円管の曲げ加工においては格子法などによるひずみ測定が行われているが、垂直ひずみの測定が主であって、せん断ひずみを精度よく測定する方法が確立されていると言えない。その理由は曲面上での角度の変化の測定が難しいこと、垂直ひずみが重畳されているのでこれを分離した形でせん断ひずみを測定する必要があることが考えられる。即ち、垂直ひずみの測定では格子の伸びの成分だけを測定すればいいので、たとえ3次元曲面上であっても比較的容易に測定できるのに対し、せん断ひずみの測定では曲面上で垂直ひずみ成分を除いた形で角度の変化を求める必要があり、これは容易ではない。

著者らはせん断ひずみの測定に対し、変形前後の格子間距離と曲面の曲率半径の測定から、垂直ひずみ成分を除いた形でせん断ひずみを取り出すアルゴリズムを得ることができた。しかし、格子の測定には多大の労力を必要とする。また、曲げ加工を行った円管のせん断ひずみは円管にけがかれた格子点間の距離を測定するだけでは得ることができず三次元における座標値が必要になる。曲げ加工を受けた円管の断面形状は円から大きく変形している部分があり、触針式三次元

形状測定器による計測ではプローブの径が大きいことおよび測定点における曲面の法線方向を決定することが困難なため、格子線上の点の座標を測定することが極めて困難である。

そこでCCDカメラおよびレーザー変位計と自動テーブルを組み合わせることで、非接触で短時間にしかも精度よくせん断ひずみを測定するための装置を開発し、円管の曲げ加工及び型材の曲げ加工におけるせん断変形の影響について基礎的な知見を得ることを目的とした。

## 2. 5軸制御ひずみ測定装置の開発

### 2.1 測定装置の構成

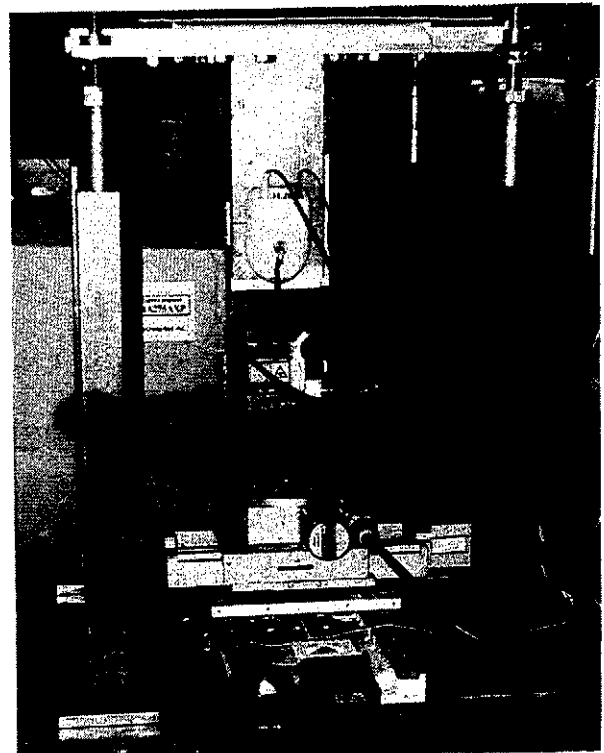


図1 ひずみ測定装置全体図

(1) 空気バネ式除振台上にX-Yテーブル、回転テーブル(Z軸まわりに回転)を組み合わせて固定し3軸制御の自動テーブルを構成する。

(2) (1)のテーブルとは独立に除振台上に4本の支柱で支えられたZ軸を構成し、Z軸テーブル下端に小型の回転テーブル固定し、回転テーブル上にCCDカメラ、レーザー変位計の測定部を取り付ける。これにより5軸制御ひずみ測定装置

を構成することができる。

### (3) 5軸制御とした理由

レーザー変位計の測定方法(三角測量法)の制限から測定物形状・部位によってはX-Y平面内で向きを変える必要があるため、また角管および円管の側面の形状およびひずみを測定することを考慮したため5軸制御とした。

(4)それぞれの自動テーブルはモータードライブおよびコントローラを介してGPIBインターフェイスで、レーザー変位計はコントローラを介してRS232Cインターフェイスでパーソナルコンピュータに接続されている。

また、CCDカメラの画像出力はパーソナルコンピュータに内蔵されたビデオキャプチャボードに出力される。

(5)上記測定装置を制御するためにOSをWindows95とするパーソナルコンピュータを用いた。また、測定用ソフトウェアはMS-Visual Basic 4.0とWindows APIを用いて開発した。

測定装置全体の写真を図1に、仕様を表1に示す。

表1 ひずみ測定装置の仕様

	ストローク	最小移動量
X軸テーブル	300mm	0.001mm
Y軸テーブル	120mm	0.001mm
Z軸テーブル	60mm	0.001mm
回転テーブル	360度	0.005度
小型回転テーブル	360度	0.005度
	測定範囲	分解能
レーザー変位計	50mm±8mm	0.5μm

## 2.2 測定方法

本測定装置ではレーザー変位計の測定値の急激な変化で格子線を判別している。しかし、レーザー変位計の出力の変化のみで格子線を判別するためにはX軸方向またはY軸方向に0.1mm以下の間隔で測定を行わなければならない。

このため被測定物のすべての面に対して測定を行おうとすると多大な時間を要する。そこでCCDカメラの画像から人間が格子点近傍の位置を指示し、そこから測定を開始する。

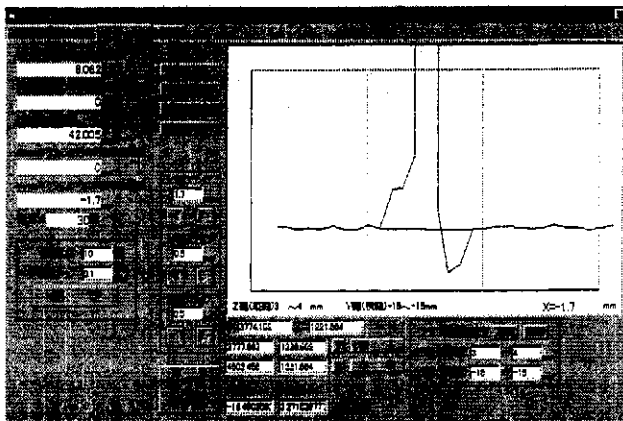


図2 格子点測定中の画面

図2に格子点測定中の画面を示す。この例では図中の横軸はY軸座標、縦軸はZ軸座標を表している。レーザー変位計が格子点を通るとZ軸座標が急激に変化する。この変化の前後の中間点を格子点のX、Y座標とする。また、Z座標は変化の前後の平均値とする。

この測定法では人間が介助する必要があるが、無駄な測定を省くために適当な測定場所を指示するだけでよく、能率よく、精度よく測定することができる。また、測定者の負担も大幅に軽減することができる。

## 2.3 測定精度

開発したひずみ測定装置の測定精度を検定するためにレーザー加工機で5mm間隔にマーキングしたアルミニウム板を測定した。このレーザー加工機は極めて高精度なものなので加工誤差は零として考えた。

被測定物の座標番号を図3、基準点からの距離の測定結果を表2に示す。表2の結果から最大で0.088mmの誤差が生じているが手作業に比較すれば格段に高い精度で測定できることが確かめられた。この誤差は測定点のマーキングがレーザー光のスポット径に比較して大きいこと、格子点周辺で穴だれのためにレーザー光のゲイン変化位置が一定でないために生じると考えられる。

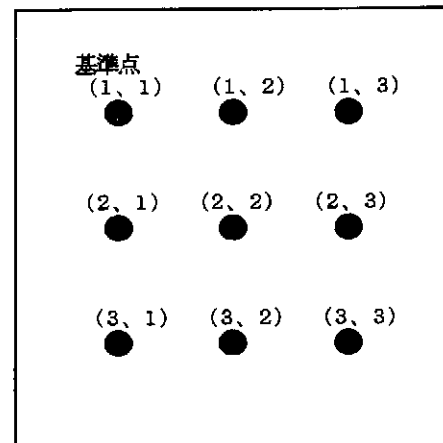


図3 測定点の座標番号

表2 基準点からの距離の測定結果

座標番号	測定結果(mm)	設定値(mm)	誤差(mm)
(1, 2)	4.975	5	0.025
(1, 3)	10.013	10	0.013
(2, 1)	4.988	5	0.012
(2, 2)	7.159	7.071	0.088
(2, 3)	11.119	11.18	0.069
(3, 1)	10.077	10	0.077
(3, 2)	11.188	11.18	0.008
(3, 3)	14.219	14.142	0.077

## 3. 円管の曲げ加工とせん断ひずみの測定

### 3.1 軸力とせん断ひずみの測定法

格子法を用いてひずみの測定を行う。円管の表面に格子を

けがくので曲面上の格子を取り扱うことになるが格子間隔を十分小さくとり、平面と見なすことにする。引き曲げにおいてはマンドレルを用いるので曲げ後の横断面は円と見なすことができる。また円周ひずみは十分小さい。変形前後の格子間隔から伸びひずみを求める。図4に軸方向伸びひずみの円周方向分布の測定例を示す。注意すべきことは、ひずみの測定の基準位置(曲げの最外側、すなわち、伸びひずみが最大となる位置とする)を一致させることが難しいということである。また、図から明らかな様に、測定誤差もあり、実験点はばらついている。そこでこの測定点を

$$\epsilon = x \sin(\theta + \phi) + y \quad (1)$$

で表し  $x$ 、 $y$ 、 $\phi$  を最小二乗法で決定する。 $\phi$  は曲げの基準位置と測定の基準位置のずれ(位相差)を表している。 $y$  の値は軸力に依存しており、均等曲げ(軸力は零)であれば零となる。 $x$  の値は管の半径と曲率半径に依存する。

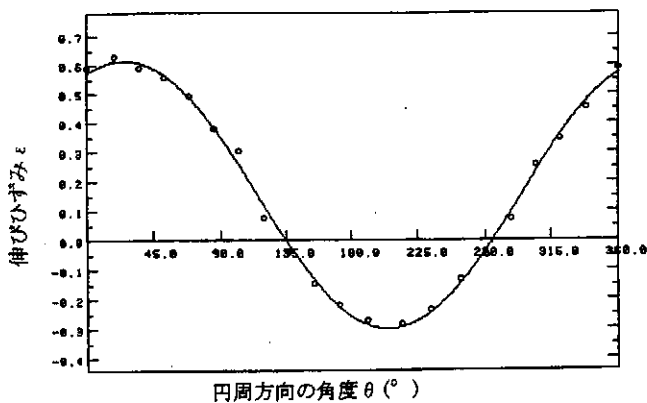


図4 伸びひずみの円周方向分布

図4の実線は最小二乗法で求めた式(1)の値を示している。この実線の最大値をとる位置を曲げの基準位置とする。このとき実験点が最大値をとる角度と実線が最大値をとる角度はかならずしも一致しない。

変形前に正方形であった格子は、せん断変形がなければ、曲げられた後は台形になる。この台形は、純粋曲げの変形に軸引張りの変形が加わったものとなっている。これにせん断変形がさらに加わったものとする。図5に変形後の格子を模式的に示す。頂点A, B, C, Dに対応する角をa, b, c, dとすると、たとえば角aはAB, AD, BDの長さから次式で計算できる。

$$a = \cos^{-1} \{ (AB^2 + AD^2 - BD^2) / (2 \cdot AB \cdot AD) \} \quad (2)$$

次にせん断ひずみが加わっていない場合の変形後の格子  $A' B' C' D'$  における角  $a^R$  は同一円周上で一定であって、例えば円管中心軸と格子の一边  $A' B'$  を一致させ、その長さを求め、次式で計算できる。

$$a^R = \cos^{-1} (A' B' / 2R) \quad (3)$$

ここで  $R$  は曲率半径、 $A' B'$  は中心軸の伸びひずみ  $\times$  素管格子長から求めることができる。したがって、せん断ひずみ  $\gamma$  は点Aにおいて  $\gamma = (a^R - a)$  で求めることができる。

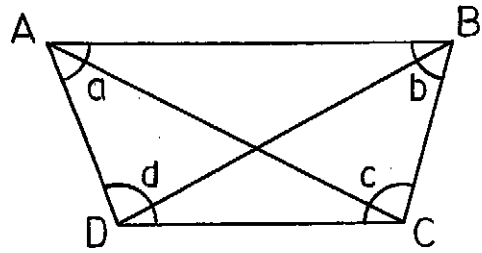


図5 変形後の格子

### 3. 2 実験結果

$\phi 32$  のA6063押出し円管を引き曲げ加工し、伸びひずみとせん断ひずみの円周方向分布を求めた。伸びひずみの測定例を図4に示した。図4のひずみ分布より軸力を求め加工条件としてブースター速度を変えたときの軸力変化を図6に示す。ブースター速度の増加に伴い、軸力はわずかに減少する傾向が見られるが、期待したほど大きくない。これは実験に用いた引き曲げ加工機の特性によるものと思われる。

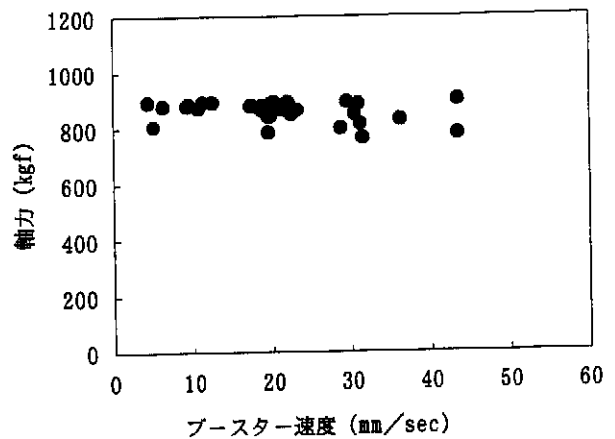


図6 軸力とブースター速度

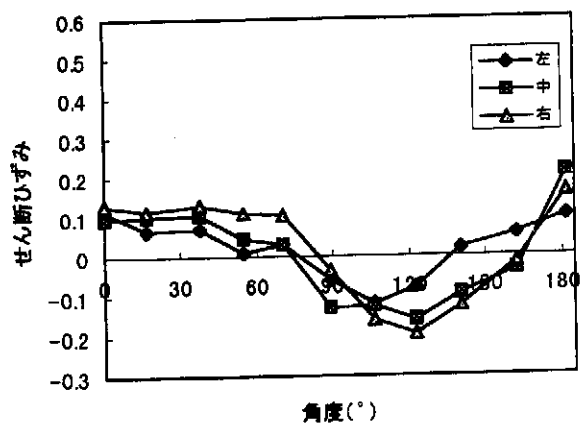


図7 せん断ひずみの分布

図7にせん断ひずみの測定結果の例(R40)を示す。図には曲がり円管の中央(中)と中央から左に約45度傾いた位置(曲げ初めから定常に達した位置)および右に約45度傾いた位置(曲げ終わりに近い位置)での測定結果の例を示す。測定

誤差を考慮すれば定常的な曲げにおいては、せん断ひずみは変化しないと考えてよさそうである。90度付近でせん断角が逆転している。

図8はせん断ひずみの最大値とブースター速度の関係を示したものである。この図からブースター速度の増加によりせん断ひずみの最大値が増加していることがわかる。

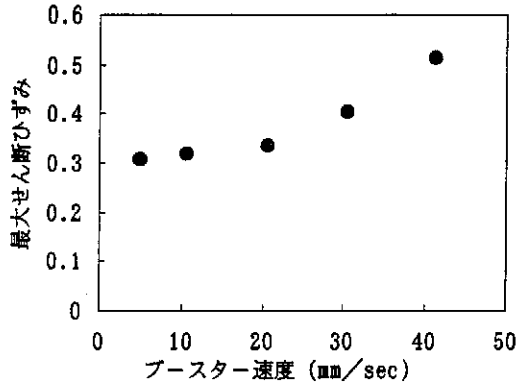


図8 最大せん断ひずみとブースター速度

#### 4. 形材の曲げ加工とせん断ひずみの測定

スペースフレームの曲げに適した新しい加工法として村田らによるMOS曲げ<sup>4)</sup>がある。筆者らはインプロセスで曲率補正を行うことを考慮してMOS曲げを少し変えたオフセットローラー曲げを提案した。図9にオフセットローラー曲げ装置の概略を示す。被加工材の角管は油圧シリンダーにより2対のガイドローラーを通過し、オフセットローラーに当たり曲げが行われ、このとき生じるスプリングバックは補正ローラーにより所定の曲率に補正される。この曲げ装置では管の曲率がなめらかに変化するようにオフセットローラーの配置がクロソイド曲線に沿ってなされている。被加工材は15mm×15mmの角管で、肉厚は1mm及び2mm、材質はA1050-O及びA6063-Oである。

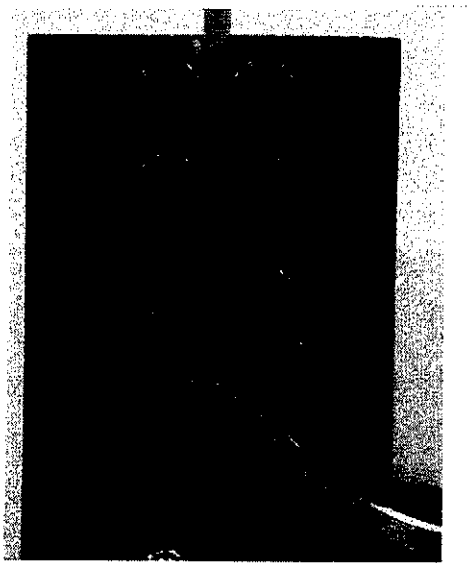
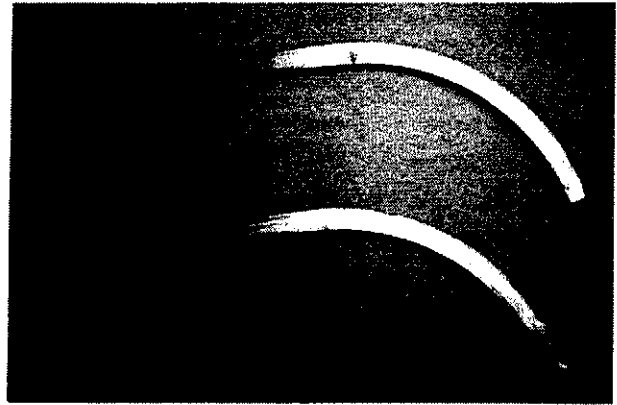


図9 オフセットローラー曲げ装置

この装置で曲げたA1050の角管を図10に示す。図において上が肉厚 $t=2$ mm、下が $t=1$ mmの例であり、どちらの場合も座屈等の変形がなく曲げられていることが分かる。

図11に軸方向中央付近でのせん断ひずみの分布を示す。このときのせん断ひずみの測定方法は前節の円管の場合と同様である。この図から曲げの中心軸付近でせん断ひずみが大きくなることが分かる。また、肉厚が厚い方がせん断ひずみが大きくなることがわかる。



(上: $t=2.0$ 、下: $t=1.0$ )

図10 曲げ後の角管(A1050)

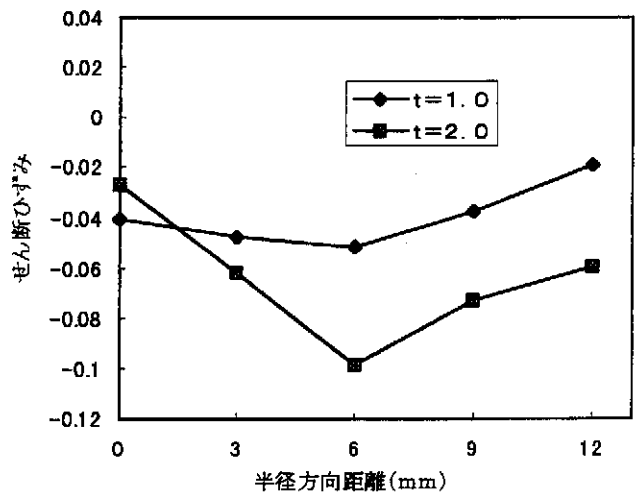


図11 せん断ひずみ分布 (A1050)

#### 5. まとめ

- (1) 円管および角管の曲げ加工において加工精度、加工限界を向上させるためにはせん断ひずみを利用することが必要であり、そのためにはせん断ひずみを精度よく測定することが必要である。そこでせん断ひずみを能率よくしかも精度よく測定するためのひずみ測定装置の開発を行った。
- (2) 開発したひずみ測定装置は人間の介助を必要とするが、この測定装置を用いると、従来の手作業に頼っていた測定と比較してはるかに能率よくしかも精度よくひずみの測定を行うことが可能になった。

- (3) 軸力のかかっている円管の引き曲げ加工におけるせん断ひずみの測定法を提示し、せん断ひずみの測定結果を示した。
- (4) 新たに考案したオフセットローラー曲げ装置で角管の曲げ加工を行い、せん断ひずみの測定結果を示した。
- (5) 開発したひずみ測定装置の測定精度はけがき線の太さ、深さなどによっても大きく影響を受けるので、けがき線となるべく均一にする必要があると考えられる。

## 7. 今後の課題

ひずみ測定の能率をあげるため及び測定者の負担を軽減するためにひずみ測定装置を自動化する必要がある。そのためには画像処理によりけがき線を抽出し、格子点の測定を自動で行うソフトウェアを開発する必要がある。

## 8. 謝辞

本研究は天田金属加工機械技術振興財団の助成によって実施されたことを付記するとともに、同財団に深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 例えば、遠藤ほか：塑性と加工、19-212、(1978)、742。
- 2) 遠藤ほか：塑性と加工、27-300、(1986)、201。
- 3) 田中ほか：塑性と加工、35-398、(1994)、232。
- 4) 村田ほか：塑性と加工、31-357、(1990)、1202。