

# 医用マイクロマシンの三次元自由形状成形プレスの開発

神奈川大学 工学部 機械工学科

教授 青木 勇

(平成7年度研究開発助成 AF-95007)

We describe the die forming of three-dimensional microcomponents. At present, most micromachines or devices are fabricated by chemical etching of silicon. From a practical point of view, fabrication using metals as the raw materials should be discussed. In this work, the die forming of medical forceps, as an example of a typical medical microtool was attempted. The forceps currently used are fabricated by a combination of precision machining and hand finishing, so that a very long period of time is required resulting in a high price. The problems of die forming for fabricating the micro-components are investigated first through fabrication using a single die. After that, a micropress system exclusively fit for the fabrication of three-dimensional microcomponents is designed and developed. This system is based on the turret-type punch press, and flexible functions for material processing, such as rotation of material are added. An other feature is that the system uses a round wire as a raw material for the components. The results of practical forming experiments confirmed that the developed micropress can be used to fabricate microcomponents.

Key words : metal forming, die forming, three-dimensional microcomponent, micromachine, press machine.

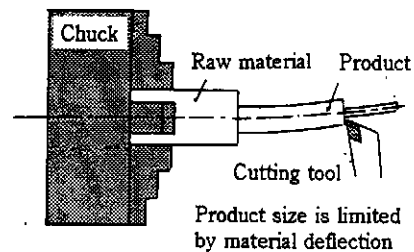
## 1. はじめに

微細な道具・機械はマイクロマシンの名で総称され、活発な研究が行われている<sup>1)</sup>。それらの多くはフォトリソグラフィとエッチング技術を基本とするものである。特に、ある程度の厚みを持った素子を成形できるLIGA技法は注目を集めている<sup>2)</sup>。

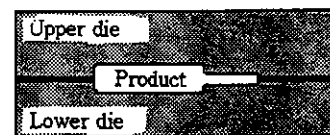
他方、従来技術の延長としての極限的加工による微細成形の試みも盛んである。放電加工による微細成形<sup>3)</sup>、電子ビーム<sup>4)</sup>やイオンビーム<sup>5)</sup>による加工、超精密加工機による切削<sup>6)</sup>・研削加工<sup>7)</sup>などで、既に実用に供されているものも多い。これらはいずれもそれぞれ固有の優れた特徴を持っているが、製品の多くは厚さ方向に変化の少ない二次元的製品、あるいは三次元でも対称形状製品が多く、より一般的な三次元の塊状物成形は必ずしも容易ではないと考えられる。

塑性加工の分野では、電子部品等の微細せん断<sup>8)</sup>、超塑性を利用した微細歯車成形<sup>9)</sup>や、微細絞り成形<sup>10)</sup>、

スピニング加工<sup>11)</sup>などの研究が行われている。微細ねじ転造や微細鋼球成形などは、以前より広く使用されている技術例であり、いずれも型成形の利点がうまく使われている。すなわち Fig.1 のように切削では、製品寸法



(a) Material deflection in cutting process



Product size depends on die making technology

(b) Principle of die forming.

Fig.1 Advantage of die forming.

・加工時間が素材寸法に依存するのに対し、型成形では加工時に素材を拘束するので、製品寸法が小さくなくても材料の支持方法が問題にならない。製品は小さくても、必要な成形工具部分が製作できればよく、型全体を小さくする必要はない。

上に述べた例は、いずれも特定製品に固有の成形技術であって塊状物の自由成形は難しい。他方、加工自由度の観点からみると、優れたインクリメンタル成形技術が数多く発表されている<sup>1,2)</sup>が、特に微細成形を意識した試みは少ないと思われる。

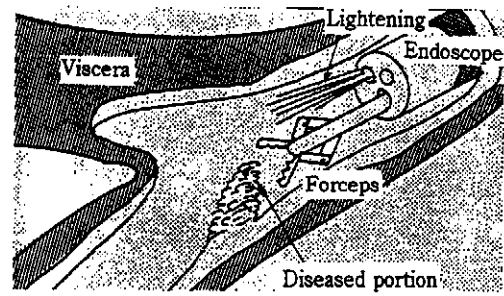
こうした観点より、型成形の特徴である生産性を生かし、かつ自由度の高い三次元形状の微細素子成形について検討することは意義あると考えられる。本研究の目的は以下の2つである。

- (1)複雑な三次元形状微細素子の型成形の可能性探求。
- (2)(1)の目的に適した成形加工機の開発とその性能追求。

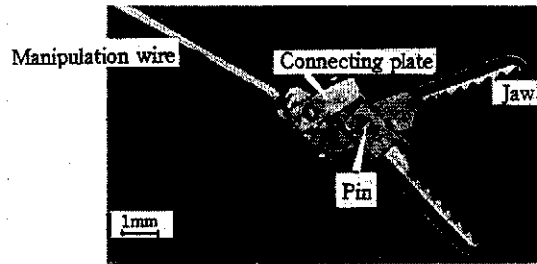
## 2. 製品形状の特定

### 2.1 医用鉗子の構成と型成形による部品の製作

本研究の趣旨からいえば、製品は微細であること以外に、できるだけ一般性を有し、しかも単一素子でなく機能性をもつものが望ましい。このような観点から、医療分野で用いられる内視鏡用鉗子を対象とした。これはFig.2(a)<sup>13)</sup>に示すように内視鏡に組み込まれ、病変患部の除去、あるいは検体採取に用いられるものである。Fig.2(b)は既存の鉗子例で、この製作図面をFig.3に示す。同図(a)は組立図で、鉗口部品(2枚)、連結板(2枚)、ピン、操作ワイヤーの4種6点から構成される。スリーブは内視鏡本体に付随するもので、製作対象から除外する。全体の大きさは外径0.6~1mm、主要部全長は10mm程度である。閉じた状態を軸方向に見れば直径1mmの円となる。同図(b)は鉗口部品の詳細図面である。各部の加工を型成形と対応させると、素材を丸線とすれば、1)平坦化(鍛造)、2)ダボ出し(鍛造又は半せん断)、



(a) Image of therapy



(b) Forceps currently used

Fig.2 Forceps currently used and image of therapy by it.

3)穴あけ(打抜き)、4)鋸口状歯付け(せん断)、5)全体の輪郭成形(打抜き)となる。現状では、これらすべて切削(旋削、フライス加工、ドリル加工など)と手仕上げによっているが、相当の時間と高い加工技術を必要とする。Fig.2(b)相当の製品では、数十分以上の機械加工と、さらに手作業部分があり、経験を積んだ熟練作業者のみが加工を実現している。

型成形との対応で見ると、鍛造加工とせん断加工のみで成形できることが予測される。他の部品についてもほぼ同様な取り扱いができるので、以下、この「鋸口部品」について検討する。

なお、本研究で医用鉗子を対象とする重要な理由が別にある。内視鏡及び関連ツールは、安全性の面から再使用に際しては、滅菌、及び付着物の除去に極めて注意深い配慮が必要とされている<sup>14)</sup>。規制は国によって異なる

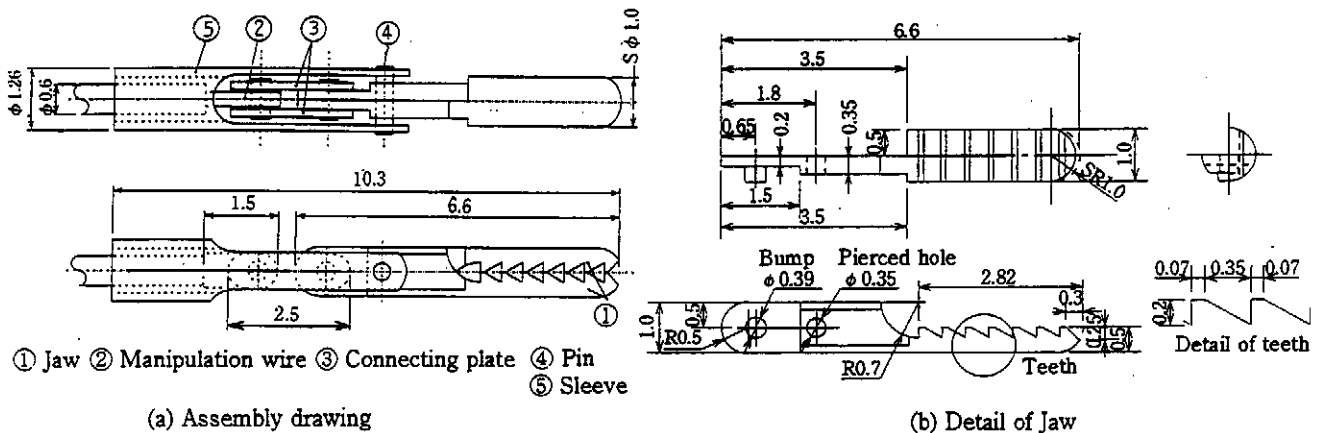


Fig.3 Detailed drawing of forceps.

るが、例えば米国ではASTMが再使用時の滅菌を義務付けている。この滅菌処理は煩雑であり、もし、既存製品に比べ、相当廉価に製造できれば、注射器などと同様、再使用しなくて済むことになる。

### 2.2 鋸口部品の特徴

既に述べたようにFig.2(b)は機械加工・手仕上げによる既存製品例である。形状は多岐にわたる(寸法的には直径で0.6-3mm程度、鋸口部は平坦、またはスプーン状など)が、同図に示す鉗子は形状的には一般性を持ち、寸法的には微細鉗子に分類される<sup>15)</sup>。Fig.3(b)が示すように鋸口部品は相当複雑な形状である。丸線側面に微細歯を成形するような、あまり一般的ではないせん断加工部分もある。この部分は患部をかみちぎる鋭さと強度が必要であり、図のような形状が指定される。同部品の寸法精度は、種類や目的で異なるが、概して厳しく、 $\pm 10-15 \mu\text{m}$ 程度である。表面粗さ(Ry)は $2 \mu\text{m}$ 程度である。また、安全面よりバリはあってはならない。

### 2.3 研究の進め方

本研究では、三次元微細成形機の開発と当該機による成形を最終目的におく、まず最初に単一金型による成形実験を通し、問題点の把握と解決手法の検討を行い、しかる後、これらの結果を踏まえた専用機の提案・開発・機能評価を行うこととした。

## 3. 単一金型による鋸口部品成形の試み

### 3.1 丸線素材の選定

三次元形状の創成では素材形状の選定が重要である。素材は薄板あるいは線材が候補となろうが、一般的な三次元形状創成を考えると丸線が優れている。理由は

- (1)丸線の寸法精度は極めて高く、直径1mm程度では寸法公差・真円度は、ともに $2-3 \mu\text{m}$ である。
- (2)製品が丸線の一部を含む場合は、素材そのものを製品の一部にできる。鋸口部品はこの例に相当する。
- (3)丸線材は薄板状・角柱状に成形できる。
- (4)製品寸法に近い丸線が使用でき、材料費が安い。

既存製品は化学的安定性、及び強度の面からステンレス鋼(SUS304)が多く用いられている。本実験でも同一素材の使用が望ましいが、形状創生の可能性を調べる観点から、加工の容易な銅線(C1100W-1/2H)、及びアルミニウム線(A1100W-H18)を主に用いた。一部、ステンレス鋼線(SUS304)も用いた。

### 3.2 加工の位置決め

板材のせん断・絞り・曲げ等を含む順送型ではパイロットピン方式が採用できるが、丸線の加工には適さない。しかし、直径寸法が高精度であること、使用長さ数mm範囲内での真直度が高い点に注目すれば、高精度な材料ガイドを用いることで、軸直角方向の位置を定め得る。

従って長手方向の位置決めを工夫すればよい。例えば、Fig.3に示すようにダボ(円柱状突起)があれば、これを最初に成形し、次工程以降(組立工程も含む)の基準とすればよい。これは、汎用的要素技術と見なせる。

### 3.3 新加工要素技術の提案

(1)特殊せん断技術 型を用いて鋸口を製作するにはいくつかの問題がある。例えば、歯付けのような複雑形状のせん断の可能性と、その条件選定である。そこでFig.4に示す丸線の半割せん断実験で基本的特性を調べたところ、次の事項が明らかになった<sup>16)</sup>。

- (1)Fig.5のようにクリアランスを小さくとれば良好なせん断が可能である。ただし、本形式の丸線せん断では、材料拘束が大きくなるので、クリアランスが若干大きくても、高い静水圧が大きな平滑面を生じせしめる。
- (2)材料拘束が大きいため、Fig.6のように側方力がせん断力の約半分と、板材せん断に比べ極めて大きい。これは高い型剛性の必要性を意味する。

本研究で対象とする成形方式の原点は丸線のせん断にあり、これらの基礎実験成果は、成形可能性を見通す上で重要と考えられる。

(2)微細工具の剛性 Fig.3に示す直径0.35mmの穴あけ、半月抜き等の工具は細く、曲げ剛性が低いため、クリアランス偏心が問題となる。前田ら<sup>17)</sup>及び著者ら<sup>18)</sup>は、対称輪郭形せん断の場合、偏心クリアランスは正作用に

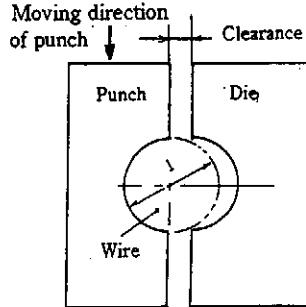


Fig.4 Shearing of round wire.

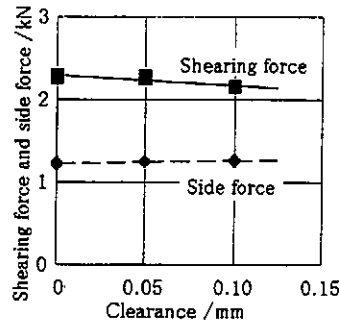


Fig.6 Influence of clearance on shearing force and side force (Wire dia.: 1mm, Wire length: 10mm, Work material: copper).

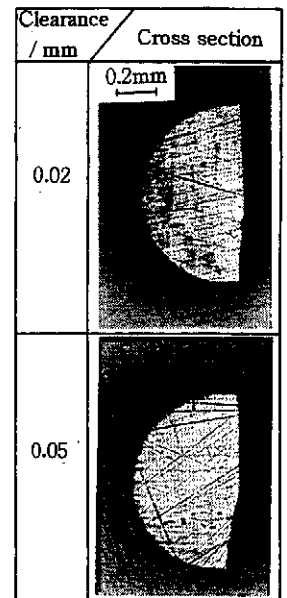


Fig.5 Cross section of sheared wire (Wire dia.: 1mm, Work material: copper).

より、僅少クリアランスでの微細せん断が実現できることを示した。しかし、非対称輪郭形せん断では偏心が是正されず、パンチ・ダイの刃先が接触する場合もあり得る。対策として、パンチ切れ刃を短く、鋭い形状変化を避け、強度的に高いものとした。

### 3.4 試作結果

前節の基礎実験・考察結果を踏まえ、成形実験を行った。工程をFig.7に、これに対応する成形状態をFig.8に示す。第1工程は平坦部の成形とダボ出し、第2工程はダボを基準として行う穴あけと半月抜き、第3工程は歯付けと最終的輪郭せん断である。なお、用いたせん断工具のクリアランスはすべて5-10 $\mu$ mである。完成した2枚の鱗口部品をピンで固定した状態をFig.9に示す。同様の手法で操作ワイヤーの成形を行い、別に慣用打抜きで作製した連結板をまとめ組立てた。完成した鉗子をFig.10に示す。なお、せん断加工では多少のバリ発生が避けられない。ここでは磁気研磨法で除去を行った<sup>19)</sup>。

本鉗子の実用性は、機能面の確認と臨床試験を経ないと厳密な評価はできないが、次の観点からは大きな問題がないことを確認した。

- (1)形状自体は既存製品と同等である（鱗口部品各部の寸法精度誤差は20 $\mu$ m以下）。
- (2)肉状物体の把持・採取能力がある。
- (3)把持・採取した場合、鉗子に損傷がない。
- (4)バリのないこと。

なお、鱗口部品のみについてはステンレス鋼を素材として成形したが、銅の場合と同様、問題なく成形できた。

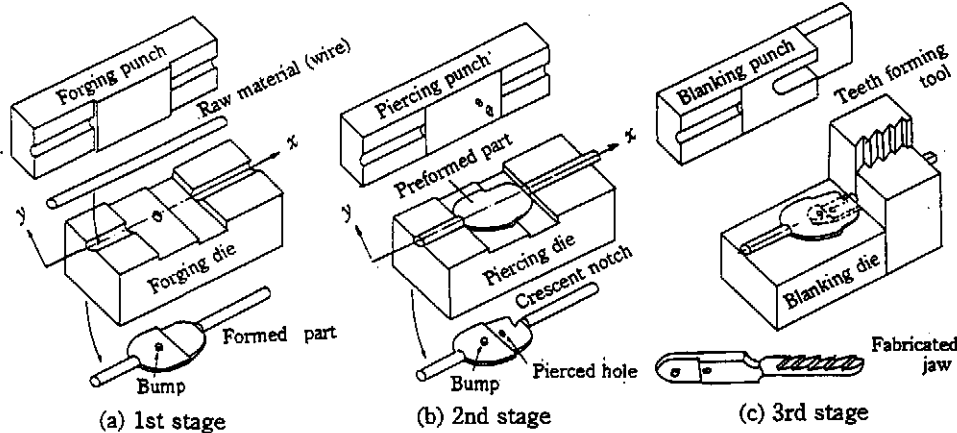


Fig.7 Schematic illustration of forming using single mould.

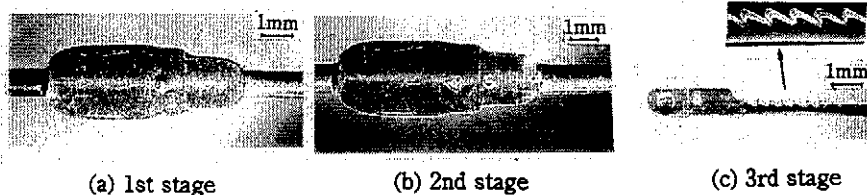


Fig.8 Formed product at each stage (Work material:copper).

## 4. 微細工具の型成形の利点と問題点

以上のように従来、機械加工と手作業を組併せて作られていた医用鉗子の型成形に成功した。ここでは最終製品寸法に近い寸法のワイヤーを用いる利点と、新たな加工要素技術を用いており、製作時間・経費は少ない。特に、機械加工及び手作業の人的費を圧縮できた点が大いと考えられる。Fig.10に示す製品の場合、組立工程を含む所用時間は3分程度、経費は型費と生産数でほぼ決まるが、5万個の生産を一式の金型で行うと仮定した場合、既存製品の数十分の1から百分の1程度と試算できた。

しかし、成形技術を総合的に評価すると、さらに検討すべき事項がある。冒頭にも述べたようにこうした製品は種類が多く、加工の自由度が要求されるが、一般の型成形にこれを求めるのは難しい。そこで型成形の加工安定性と生産性を生かしつつ、自由度の高い成形機の試作を検討した。

## 5. 三次元マイクロ素子成形プレスマシンの試作

### 5.1 加工システムの概念設計

加工自由度の高いプレスマシンにタレットパンチプレスがある。これは材料をx-yテーブルで位置制御し、さらに選択したパンチ・ダイで任意形状の打抜きを行うものであるが、板材に限られる。著者が意図するのは線材を用いる三次元形状成形である。そこでタレットパ

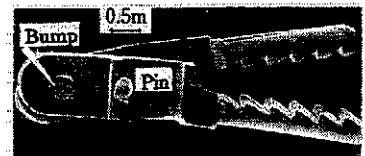


Fig.9 Pinned jaws.

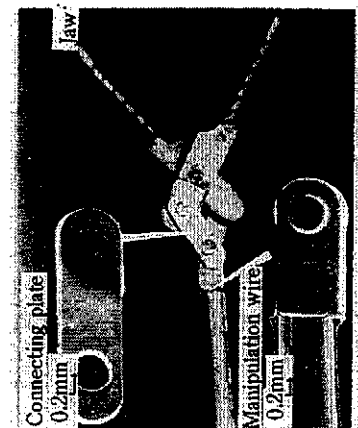


Fig.10 Assembled forceps.

ンチプレスの加工自由度を生かしつつ、三次元成形できる技術、並びに加工機の開発を試みることにした。

検討の結果、基本的にタレットパンチプレスにいくつかの機能を付加し、最終的に次のような方式とすることで、成形できる見通しを得た。

- (1) 素材に丸線を用いる。
- (2) 円周方向に素材が回転できる機能 ( $\theta_2$ 軸) を与える。
- (3) さらに  $x$ - $y$  ステージに回転ステージ ( $\theta_1$ 軸) を追加し位置決めを4自由度 ( $x$ 軸,  $y$ 軸,  $\theta_1$ 軸,  $\theta_2$ 軸) とする。
- (4) 工具を加圧する部分 (以下ストライカー) は圧縮工程等で任意位置での下死点制御 (フルクローズド制御) ができる構造とする。
- (5) 工具は複数個用意し選択する。汎用工具のほか、専用の工具を容易に交換できるように、シャンク部形状を標準化する。この点は既存のタレットパンチプレスと同様である。

以上のように、本システムは完全な加工自由度をねらうものでなく、ある範囲内での製品仕様変更には最初設定した工具群で対応し、大幅な仕様変更には工具交換を伴うもので、経費・制御方式等を考えた折衷のマシンである。このマシンが想定する一般的加工手法例をFig.11

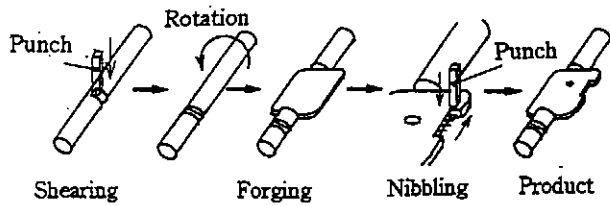


Fig.11 Fundamental processing procedure.

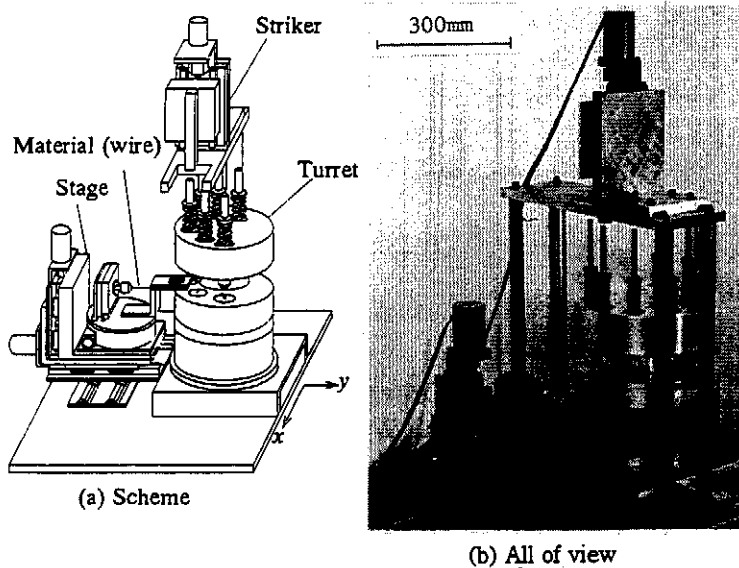


Fig.12 Developed press machine.

に示す。側面部の加工、この面より任意角度回転した部分の鍛造またはせん断による平坦部成形、さらに各部分の追い抜き加工などの組み合わせで、一般的な三次元形状が成形できる。寸法は、タレット部外径が300mmのデスクトップサイズとした。

### 5.2 試作したシステムの構成

以上の構想に基づき三次元微細素子成形プレスマシンを試作した。装置全体の構成と外観をFig.12に示す。システムの詳細はFig.13のように、工具を収納するタレット部、材料を保持し加工位置を定める移動ステージ、ストライカー、及びこれらを制御するドライバーとコンピュータで構成される。

タレットは上部にパンチ、下部にダイが装填され、必要な工具軸が選定される。現状の工具軸は8軸であるが、さらに、ビーム加工軸 (例えばレーザ加工)、機械加工軸 (例えば極細エンドミル) の追加が可能で、部分的に

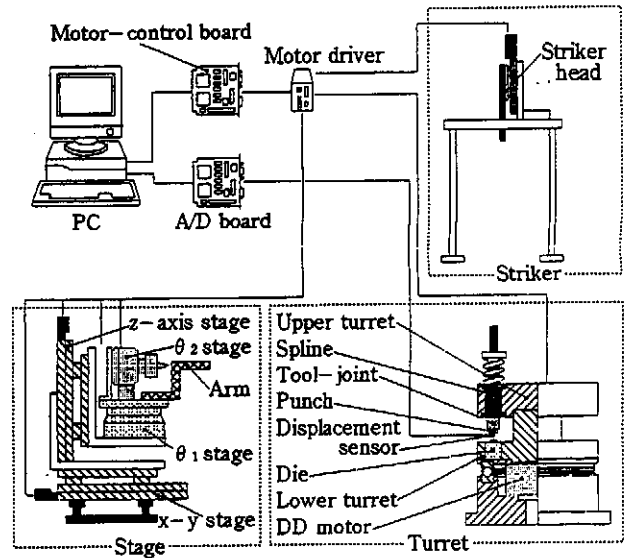


Fig.13 Detail of system developed.

Table 1 Specification of driving device.

DD motor	
Absolute rotation accuracy	30"
Rotation repeatability	2"
$\theta_1, \theta_2$ stage	
Absolute rotation accuracy	108"
Rotation repeatability	18"
Backlash	18"
Parallel accuracy	20 $\mu$ m
x-y stage, Striker	
Absolute positioning accuracy	15 $\mu$ m
Positioning repeatability	2 $\mu$ m
Backlash	3 $\mu$ m

複雑な加工・接合等はこれらが分担することができる構造となっている。軸数は、形状の複雑さや仕様変更の程度を考慮して決めれば良い。本実験では、鉗子部品製作を目的とすることより8軸と決めた。

移動ステージには材料を支持するアームが取り付けられ、 $x y z \theta_1$ ステージにより位置制御され、さらにアーム後方に、丸線素材保持チャックを回転する機構 $\theta_2$ ステージが設置されている。タレット駆動はDDモータ、その他の駆動はACサーボモータ、及びステップモータを用いた。なお、圧縮行程では加工力が大きく、工具各部の弾性変形が製品誤差（厚さ）に直接影響するため、パンチにつけた変位センサー出力を用い、パンチ変位を制御した。各駆動系の公称精度をTable 1に示す。

### 5.3 加工工具の構造と種類

(1) 工具構造 5-1(5)で述べたとおり、工具シャンク部の形状を標準化することで、工具交換と心合せを容易にしている。また、単一型成形の場合と同様、不均等な側方力が作用する場合、細いパンチでは、側方力が小さくても曲がりを生じ、ダイとの接触や欠損・異常摩耗を招く。例えば、V字型歯付け工具では、刃のくさび状部分から逆方向に側方力が働く。この対策として、ダイで不均等側方力を受ける構造とした。すなわち、Fig.14に示すようにパンチ切れ刃が材料に接する以前に、ダイが反対側パンチ面を拘束し、パンチ変形を防止する。

パンチはボールスプライン先端に標準化した継手を介し保持され、上下方向に直線運動ができる。この場合、スプラインの直線運動精度と曲げ剛性が重要である。加工変位内での振れ精度は約 $3 \mu\text{m}$ である。剛性は側方力に対抗するものであるが、本研究では微細製品を対象とするので、大きな問題とならない。パンチに比べスプラインの剛性が十分大きいため、例えば歯付け工具では、側方力による軸先端変位は $2 \mu\text{m}$ 以下となる。なお、せん断工具のクリアランスはすべて $5-10 \mu\text{m}$ である。

(2) 工具種類 本システムは加工自由度の高いことを目的とする。ここでは、丸線素材直径(1mm)を一定と想定し、工具を選択した。共通的汎用工具は丸線に平坦部を創成する圧縮工具、基本角形輪郭打抜き工具、基本穴あけ工具であり、これらの工具を用い、さらに追い抜き加工を併用することで、ある程度の任意形状を創成する。特定寸法穴あけ工具、歯付け工具は文字どおり特定部成形用ということになるが、例えば、歯付けピッチは、同一工具でも加工位置指定で任意に変更できる。

なお、最少種類の工具で最大種類の加工自由度を与える最適設計の観点から、工具種類を決めることが必要であることはいうまでもなく、これは今後の課題としたい。

### 5.4 材料の加工位置

3章に述べた基礎実験では、材料の特定した位置を加

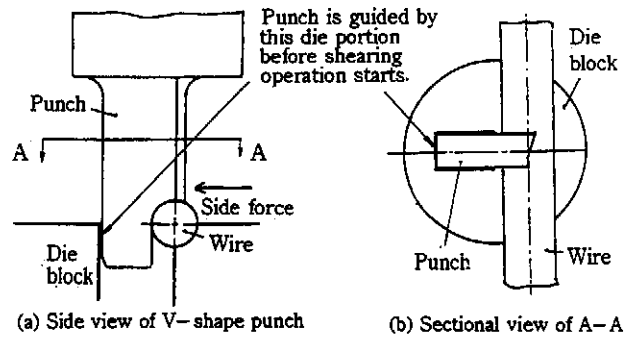


Fig.14 Counterplan for side force acts on thin punch.

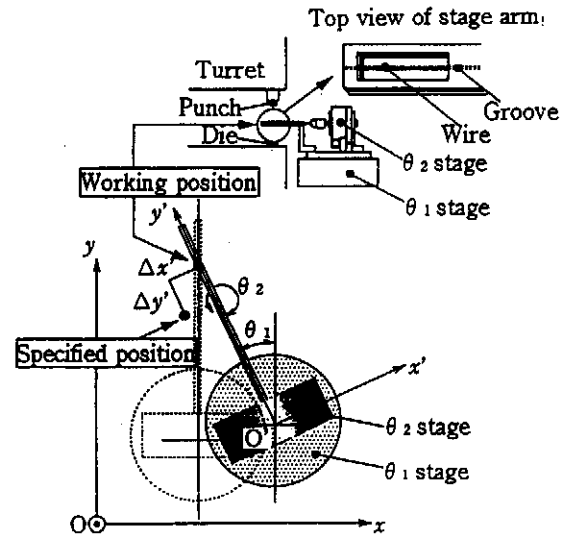


Fig.15 Specification of working position.

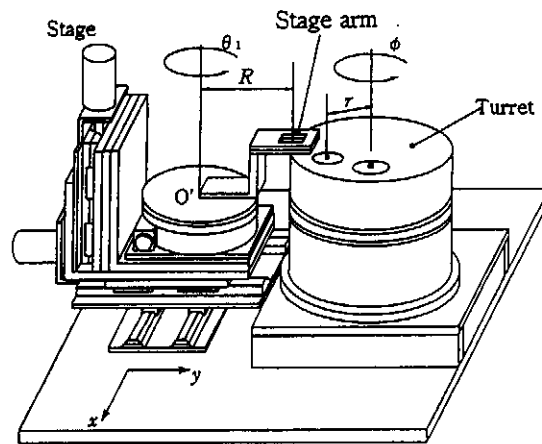


Fig.16 Driving and working coordinates.

工基準（例えばダボ）とした。本システムでも製品形状が特定される場合は有効であろう。ここでは一般的な形状の加工部品に対応させることを目的として、材料の加工位置指定は、機械側を原点として材料移動ステージに座標系を定め、ステージアームの位置制御を行うことにより定めた。加工位置指定状況をFig.15に示す。Fig.16

の駆動座標系を参照すれば加工位置座標は次式のようになる。ここに、座標はステージアームの回転中心を原点O'とし、アーム長手方向をy'座標、これに直交する方向をx'座標としている。

$$x' = x \cos \theta_1 - r \sin \phi \cos \theta_1 - y \sin \theta_1 - R \sin \theta_1 + r \sin \theta_1 - r \cos \phi \sin \theta_1 \quad (1)$$

$$y' = x \sin \theta_1 - r \sin \phi \sin \theta_1 - y \cos \theta_1 - R \cos \theta_1 + r \cos \theta_1 - r \cos \phi \cos \theta_1 \quad (2)$$

ここで

- x: xステージ移動量
- y: yステージ移動量
- $\theta_1$ :  $\theta_1$ ステージ回転角
- $\phi$ : タレット回転角
- R: アーム長さ(140mm)
- r: タレット回転中心から加工点までの長さ(115mm)

実際の加工位置は、これに駆動系各部の持つ精度上の誤差が加わる。誤差 $\Delta x'$ 、 $\Delta y'$ は計測工学の誤差伝播の知識より<sup>20)</sup>求めることができる。Table 2はTable 1の数値より求めた精度を示す。この誤差は加工時のx', y'軸上で表している。ここで、位置精度は設定値と計測値の比較より補正し得るので、繰返し精度が重要となり、Table 2のように12 $\mu$ m以下に抑えることができる。

## 6. 微細部品の試作例

### 6.1 試作実験

基礎実験で作製した鉗子主要部品である鱗口部品の成形を試みた。工具の都合で若干形状は異なる。成形手順をFig.17に示す。①歯付け(追い抜き)後、②平坦部成形(2段成形)、③平坦部に直径0.3mmの穴あけ、④平坦部にダボ出し成形(2段ダボ)、⑤試料180度回転後、汎用角形打抜き工具を用い、追い抜きによる平坦部の輪郭成形・切り落としである。成形素材は3-1で述べた直径1mmの銅、アルミニウム丸線である。銅丸線を素材とした製品例をFig.18に示す。

Table 2 Accuracy of material positioning calculated.

	Absolute positioning accuracy	Repeatability
	/ $\mu$ m	/ $\mu$ m
$\Delta x'$	19	12
$\Delta y'$	15	2

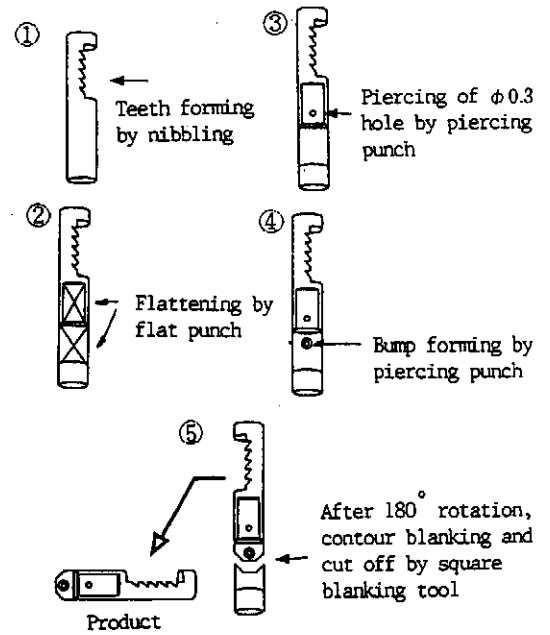


Fig.17 Forming stage of jaw by press machine developed.

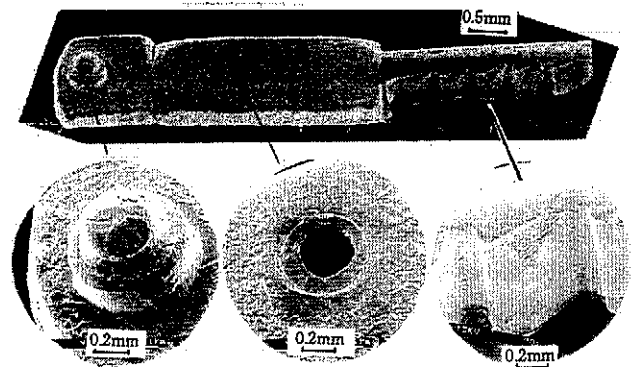


Fig.18 Formed jaw by press machine developed. (Work material:copper)

### 6.2 精度検査

Fig.18に示す製品寸法精度誤差は、設定寸法に対し、丸穴内径15 $\mu$ m、ダボ外径16 $\mu$ m、丸穴-ダボ間寸法は20 $\mu$ m、歯ピッチは6 $\mu$ mとなり、組立て精度等からみて一応満足できる数字である。しかし、さらに一層の微細化・高精度化を目指す努力が必要と考えられる。

また、これとは別に丸線に0.5mmピッチで3個の穴あけ実験を10回行い、繰返し精度の検査を行った。この結果、 $\Delta x'=4\mu$ m、 $\Delta y'=2\mu$ mとなり、Table 2に示した値を満足することが確認された。

## 7. まとめ

三次元微細素子を、せん断加工を主体とする型成形方式で製作することを目的として、基礎成形実験を行った。さらに、この結果を基に、成形自由度の高い三次元微細

素子成形プレスマシンの試作を行った。

#### 7.1 基礎成形実験の結果

- (1)丸線の半割せん断で平面創成できることを確認した。  
この場合、僅少クリアランスとすべきこと、側方力が大きくなるので型の剛性が必要であることが分かった。
- (2)医用鉗子部品を微細素子の例と考え、単型による成形を行い、形状的に既存製品と同等製品が試作できた。  
この場合の加工技術は、ほとんどがせん断であり、一部鍛造を用いた。

#### 7.2 微細素子用三次元成形プレスマシンの試作結果

- (1)丸線を成形素材とするタレットパンチ方式の、デスクトップサイズ三次元マイクロ素子成形プレスを試作した。
- (2)平面内での材料移動と材料回転により、加工位置に4自由度を与え、工具の選定で相当複雑な三次元微細成形が可能であることを確認した。一例として、単型で成形した類似形状の微細部品の成形に成功した。
- (3)製品精度は各駆動部精度より計算される値とほぼ一致した。

本システムは、最適工具の選択・加工自由度・微細化など、今後検討すべき事項は多いが、当初の目的の第1歩は達成できたと考えている。

## 謝 辞

本研究は天田金属加工技術振興財団研究助成（平成7年度）の支援を受けて行われたものであり、同事業団に深甚の謝意を表す。また、鉗子の機能等につき有益な助言を賜った医学博士・斎藤雄介氏に厚く御礼を申し上げます。

## 参考文献

- 1) Crandall, B.C. & Lewis, J. : Nanotechnology, (1992), 215.
- 2) Rogner, A., Eicher, J., Münchmeyer, D., Peter, R.P. & Mohr, J. : Journal of Micromachining and Microengineering, 2-3 (1992), 133.
- 3) 佐藤健夫 : 精密工学会誌, 61-10 (1995), 1369.
- 4) 大西毅・石谷亨 : 真空, 34-12 (1991), 861.
- 5) 谷口諄・宮本巖・駒坂友則 : 平7秋精密工講論, (1995), 877.
- 6) Okano, K., Waida, T., Suto, T. & Kobayashi, T. : Proceedings of the International ABTEC Conference, (1993), 100.
- 7) 沢田潔 : 第1回マイクロマシンシンポジウム論文集, (1995), 119.
- 8) 神馬敬・足立達也 : 塑性と加工, 33-379 (1992), 898.
- 9) 早乙女康典・秦誠一・伊藤明俊・坂口幸二 : 平4春塑加講論, (1992), 127.
- 10) 早乙女康典・安田要・伊藤明俊・天田重庚 : 平5春塑加講論, (1993), 585.
- 11) 斎藤正美 : 塑性と加工, 33-379 (1992), 977.
- 12) 編集委員会 : 塑性と加工, 35-406 (1994), 1252.
- 13) Katzir, A. : Scientific American, 260-5 (1989), 120.
- 14) Kawahara, I. & Ichikawa, H. : Gastrointestinal Endoscopy, 20-41 (1987), 73.
- 15) 中原秀起・森本常之・渡辺民重・亥角英行・大瀬誓六・内海厚 : 三菱電線工業時報, 86 (1993), 20.
- 16) 青木勇・高橋俊典・細野真一郎・前田俊介 : 45回塑加連講論, (1994), 639.
- 17) 前田禎三・銘苺春栄 : 塑性と加工, 18-196 (1977), 329.
- 18) 青木勇・高橋俊典 : 平6春塑加講論, (1994), 103.
- 19) 高橋俊典・青木勇・鈴木清・樋口俊郎 : 平8春精密工講論, (1996), 919.
- 20) 谷口修・堀込泰雄 : 計測工学, (1991), 10, 森北出版.