

# 微細精密せん断における偏心クリアランス是正作用

神奈川大学 工学部 機械工学科

助教 笹田 昌弘

(平成 18 年度奨励研究助成 AF-2006030)

キーワード: せん断加工, 工具変形, 有限要素解析

## 1. 研究の背景と目的

近年, 電気・電子製品を中心に微細化が進んでいる。これにともない部品の微細化が進み, せん断加工製品へ数ミクロンの高精度が要求される分野が拡大している。せん断加工により微細部品の加工を行う場合の問題のひとつに, 金型の精度がある。複数部品を組み合わせる金型で心合わせやクリアランスの調整は, 製品の微細化にともないますます難しくなる。

こうした高精度せん断加工の実現に関しては, 以前より「偏心クリアランス是正作用」の存在が考えられてきた。これはクリアランスが左右不均等な場合, これを是正する機構が存在するというものである<sup>1)</sup>。本作用に関し, これまで高橋らが是正機構を実験的に検討している<sup>2)</sup>。また, 本作用は主に側方力に依存することと, 材料拘束等のせん断条件の影響が大きいことが明らかになっている<sup>3)</sup>。著者らは, 細長く変形しやすいパンチの場合, パンチに作用する側方力差だけでなくせん断力も是正作用へ影響を及ぼすことを報告した<sup>4)</sup>。

パンチ変形を積極的にクリアランス調整等に利用できれば, 微細部品の金型成形における問題の一つを解決できると考えられ, 加工条件の影響を調べる必要がある。本報告では, 有限要素解析及び実験を行い, パンチ長さ及び被加工材の変位拘束が偏心クリアランス是正作用へ及ぼす影響を検討した結果を報告する。

## 2 有限要素解析及び検証実験方法

### 2.1 有限要素解析

#### 2.1.1 パンチ長さの影響

パンチ長さの偏心クリアランス是正作用へ及ぼす影響を検討するため, 有限要素解析ソフト Marc を用いて, 平行複刃型せん断を対象とし弾塑性有限要素解析を行った。せん断荷重点を超え, 且つ, き裂が発生する以前までを解析対象とした。図 1 に解析モデルの刃先近傍の概略図を示す。対象を平面ひずみ場として扱った。

パンチ寸法は, 厚さ 1.2mm 一定とし, 長さを 7,12,15,18,22 及び 30mm の 6 種類とした。被加工材を弾塑性体, パンチを弾性体, ダイス及び板押えを剛体とした。なお, パンチと板押えの間には隙間があり, 板押えはパンチをガイドしない。ダイス形状を一定とし, クリ

アランス調整ブロックでクリアランス設定を行い,  $C_L15\% C_R15\%$ ,  $C_L10\%C_R20\%$ 及び  $C_L5\%C_R25\%$ とした。クリアランス  $C$  は板厚に対する百分率であり, 添字の  $L, R$  はそれぞれ左側, 右側を表す。ダイス刃先丸み  $R$  を  $20\mu\text{m}$  とした。摩擦は摩擦係数  $\mu=0.1$  のクーロン摩擦とした。パンチ長さの影響を調べる場合の板押えは, バネ式であり, 板押え力を  $216\text{N}$  とした。

せん断加工の有限要素解析では計算途中で要素を再分割する必要がある。次の条件の一方を満たした時点で ABCD 内(以下, リメッシュ部)の再分割を行った。

- (1) パンチストロークが  $3\mu\text{m}$  増加する毎。
- (2) パンチと被加工材の要素の重なりが  $0.5\mu\text{m}$  に到達。

被加工材のリメッシュ部要素数を約 60,000 とした。要素は四角形四節点要素であり, 刃先近傍の要素の一辺の長さは約  $4\mu\text{m}$  である。

対象とした被加工材は長さ 30mm, 幅 8mm, 厚さ 0.5mm のアルミニウム軟質材 (JIS 規格: A1100P-O) である。材料特性は引張試験より求めた応力-ひずみ曲線を用いた。被加工材の弾性域での材料特性は縦弾性係数  $69\text{GPa}$ , ポアソン比 0.33 とした。被加工材の塑性領域の特性を次式に示す。

$$\bar{\sigma} = 33 + 142\bar{\epsilon}_p^{0.37} \quad (\text{MPa}) \quad (2)$$

パンチは縦弾性係数  $210\text{GPa}$ , ポアソン比 0.3 の弾性体とした。

#### 2.1.2 材料拘束の影響

パンチ長さ 15mm の場合を対象とし, 被加工材への変位拘束が偏心クリアランス是正作用に及ぼす影響を調べ

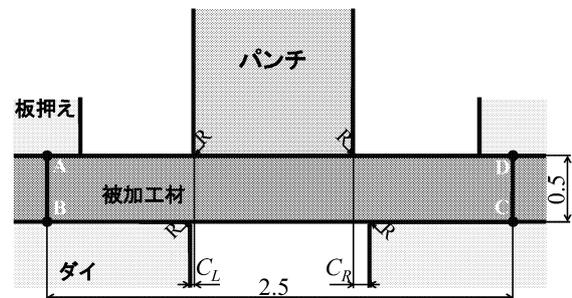


図 1 解析モデルの概略図 (刃先近傍)

るため、弾塑性解析を行った。解析モデル概略図を図 2 に示す。拘束有りの場合、板押えは被加工材の Y 方向変位を拘束するとともに被加工材端部の X 方向変位を拘束する。拘束無しの場合には、板押えは被加工材の Y 方向変位のみ拘束する。なお、板押えは固定式である。その他は、パンチ長さの影響を調べる場合の解析条件と同様である。

## 2.2 検証実験方法

### 2.2.1 パンチ長さの影響

解析結果の検証を行うため、パンチ長さ 7 と 15mm の

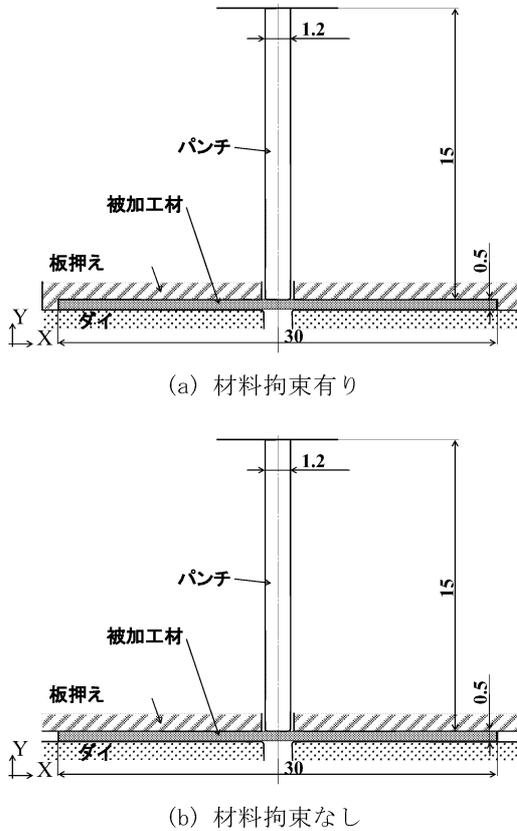


図 2 解析モデル概略図

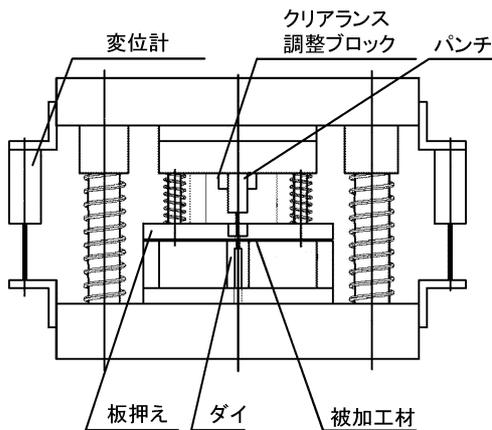


図 3 実験用金型概略図 (パンチ長さの影響)

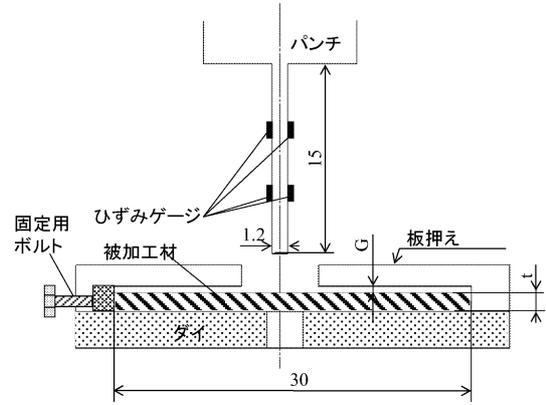


図 4 実験用金型概略図 (材料拘束の影響)

場合の実験結果と有限要素解析結果を比較することとした。板押え有りのパンチ長さ 15mm の実験結果は、既報<sup>4)</sup>の結果を利用し、パンチ長さ 7mm の場合の実験を行った。実験金型の概略図を図 3 に示す。パンチの厚さを 1.2mm、幅 8.5mm とした。クリアランスは、 $C_L5\%C_R25\%$  とした。パンチ・ダイス材質は SKD11、硬さ 60HRC である。被加工材は長さ 30mm、幅 8mm、厚さ 0.5mm のアルミニウム軟質材 (JIS 規格 : A1100P-O) である。板押えはバネ式とし、せん断開始時の板押え力  $F_h$  は 216N とした。潤滑油はパラフィン系基油 ( $90 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ ) とし、加工開始前に試験片表面に塗布した。加工速度は  $50 \mu\text{m}/\text{s}$  とした。

パンチの変形量、せん断力及び側方力差は、高橋らにより提案されたひずみゲージ出力を用いる方法<sup>2)</sup>により求めた。パンチ側面にそれぞれ 2 枚のひずみゲージを貼り付け、ひずみを計測した。パンチ長さ 7mm の場合はパンチ根元より 2.5mm 及び 4mm の位置にひずみゲージを貼り付けた。なお、パンチ長さ 15mm の場合はパンチ根元より 6mm 及び 9mm の位置にひずみゲージを貼り付けた。

### 2.2.2 材料拘束の影響

材料拘束の影響を確認する実験は、パンチ長さの影響を確認した実験用金型の板押えのみ変更して行った。加工部近傍の詳細を図 4 に示す。パンチ長さは 15mm、幅 8.5mm、厚さ 1.2mm で一定、材質はパンチ、ダイスともに SKD11、60HRC である。被加工材はアルミニウム軟質材 A1100P-O とし、試験片寸法は幅 8mm、長さ 30mm、厚さ 0.5mm である。

被加工材の拘束状態は、図 4 のように板押え側面と被加工材の長手方向端面を接触させて水平方向を拘束する。垂直方向については板押え下面と被加工材上面の間隙 (G 部分) を  $10 \mu\text{m}$  程度とした。クリアランスは、 $C_L5\%C_R25\%$  とした。潤滑油は動粘度  $90 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$  のパラフィン系基油を加工開始前に試験片の両表面に塗布する。また、パンチの変形量、せん断力及び側方力差はパンチ長さの影響を調べる場合と同じくひずみゲージ出力を用いる方法<sup>2)</sup>により求めた。ひずみゲージ貼付位置は、パンチ根元より 5.5mm 及び 9mm の位置である。

### 3 結果及び考察

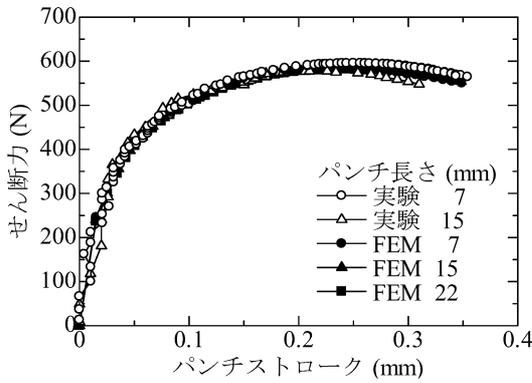
#### 3.1 パンチ長さの影響

パンチ長さのせん断力及び側方力差への影響を図5に示す。パンチ長さが側方力差に影響を及ぼすことがわかる。図6にパンチの変形形状を示す。図7にはパンチ先端横変位とパンチストロークの関係を示す。不均等クリアランスを是正する方向のパンチ変形を正、その逆を負として示す。パンチ長さの増加と共に、変形量も増加している。

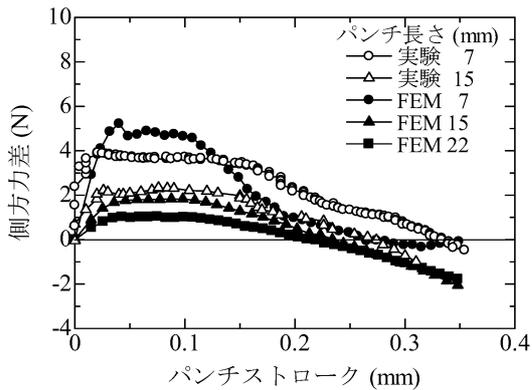
是正作用について考察を進めるため、変形に及ぼす側方力とせん断力の影響を定性的に把握した。側方力とせん断力は独立でパンチに作用していないため、厳密にはそれぞれの力により求めた変形量を重ね合わせて全体の変形量を求めることはできない。しかし、この場合、パンチ変形量が微小であることから、変形に及ぼす諸力の影響を定性的に把握するため、有限要素解析結果より抽出した側方力とせん断力を基に、式(2)により変形量の算出を行った。

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M}{EI} \quad (2)$$

y はたわみ, x は位置, M はモーメント, E はヤング率, I は断面二次モーメントである。側方力差より求めたモーメント  $M_H$ , せん断力より求めたモーメント  $M_V$  とし, そ



(a) せん断力



(b) 側方力差

図5 せん断力及び側方力差とパンチストロークの関係

れぞれのモーメントをパンチに作用させた場合の先端の横変位量を算出する。なお、せん断力によるモーメントは固定モーメントとして扱う。また、重ね合わせによる誤差を確認するためそれぞれの力による変形量の和も算出している。この状況を模式的に図8に示す。

$M_H$ 及び $M_V$ から計算されるパンチ先端の横変位量を図9に示す。 $M_H$ 及び $M_V$ から計算されるパンチ先端の横変位量の和は、定量的にわずかに差があるが定性的に有限要素解析結果と良い一致を示しており、パンチ長さの偏心クリアランス是正作用への影響をせん断力及び側方力

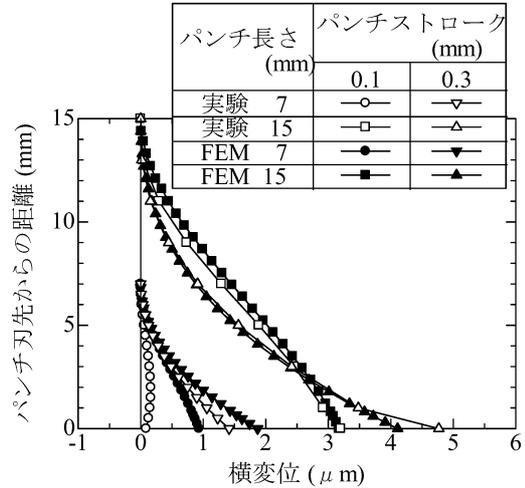


図6 パンチの変形形状

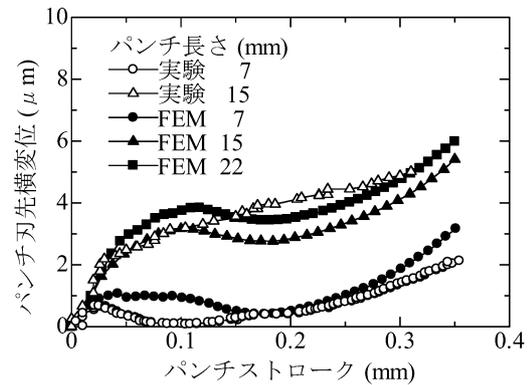


図7 パンチ先端横変位

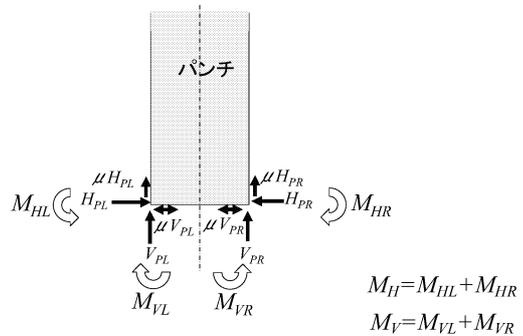
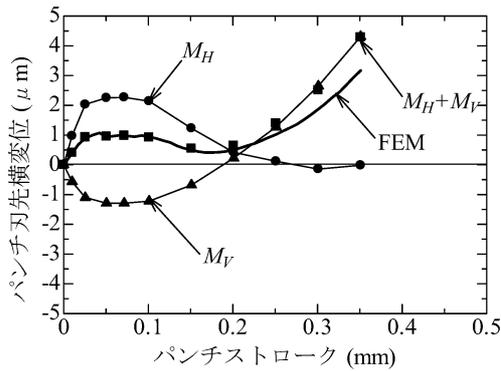


図8 パンチに作用する力とモーメント

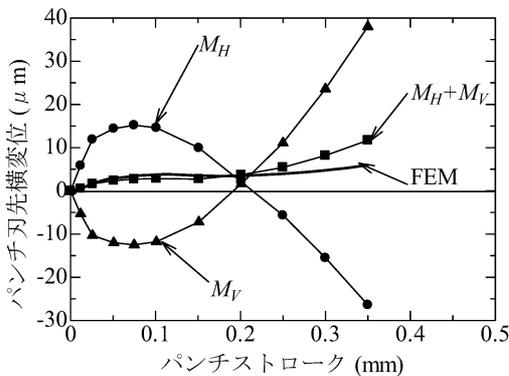
の変化から考察できると考えられる。

パンチ長さに関係なく、 $M_V$ によるパンチ変形は、加工の進行とともに反是正方向からは正方向へと変化する。垂直力  $V_{PL}$  及び  $V_{PR}$  とパンチストロークの関係を図 10 に示す。パンチ長さの垂直力への影響は小さい。パンチの剛性と作用する力によりパンチの変形が決まるが、パンチ長さの垂直力への影響が小さいことから、 $M_V$ によるパンチ変形へは剛性の影響が大きいと考えられる。

一方、 $M_H$ によるパンチ変形は、加工の進行とともに是正方向から反是正方向へと変化する。パンチが短い場合でも  $M_H$ によるパンチ変形は是正方向から反是正方向へ変化するが、長い場合に比べると反是正方向への変形は



(a) パンチ長さ 7mm



(b) パンチ長さ 22mm

図 9 セン断力及び側方力差の変形に及ぼす影響

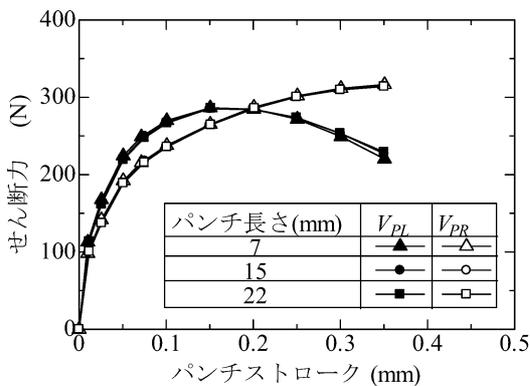


図 10 セン断力の変化 (FEM)

小さい。図 5 からわかるように、パンチ長さが増えると側方力差が変化する。このことから、 $M_H$ によるパンチ変形へは、パンチの剛性及び側方力差の変化が影響すると考えられる。

パンチストローク 0.1 及び 0.35mm におけるパンチ長ささとパンチ先端横変位の関係を図 11 に示す。パンチ長さがある程度長くなると、是正量の増加が期待できないことがわかる。このことに関して以下で考察する。

パンチストローク 0.1mm におけるパンチ変形形状を図 12 に示す。パンチ長さが 30mm の場合、刃先が最大変位とならない変形形状となっている。このような変形形状に近づくため、パンチがある程度長くなると是正作用が増加しにくくなると考えられる。なお、図 12 のような変形形状となることは、図 10 に示される左右の垂直力に関係すると考えられる。 $V_{PR}$ よりも大きな  $V_{PL}$  が作用した状態でパンチを被加工材へ押込むため、剛性が低くなる長いパンチは、このような変形形状となると解釈できる。

パンチストローク 0.35mm におけるパンチ変形形状を図 13 に示す。パンチが長くなると、パンチの一部が反是正方向へ変形する。このような変形を伴うことから加工後半でも、パンチ長さがある程度長くすると、是正量は増加しにくくなると考えられる。

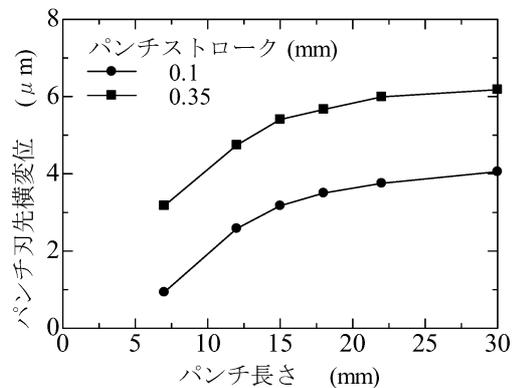


図 11 パンチ長さのパンチ先端横変位に及ぼす影響(FEM)

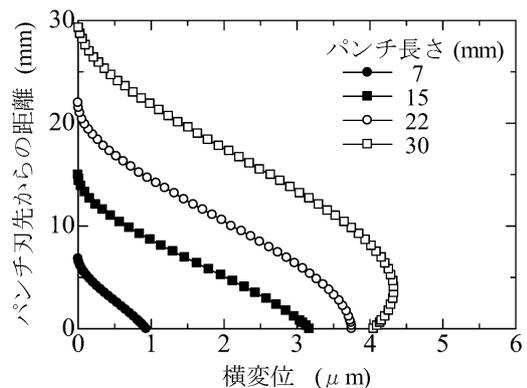


図 12 パンチ長さの変形形状に及ぼす影響 (FEM, パンチストローク 0.1mm)

以上のことから、本研究のせん断条件の範囲内では、パンチをある程度以上に長くしても是正量の増加は期待しにくいと考えられる。

### 3.2 材料拘束の影響

拘束有りとなしの場合のせん断力及び側方力差線図を図14及び図15に示す。側方力差は、クリアランスの小さい左側の側方力とクリアランスの大きい右側の側方力の差である。有限要素解析結果は、定量的にわずかに差が見られるが、定性的には実験結果と良い一致を示し

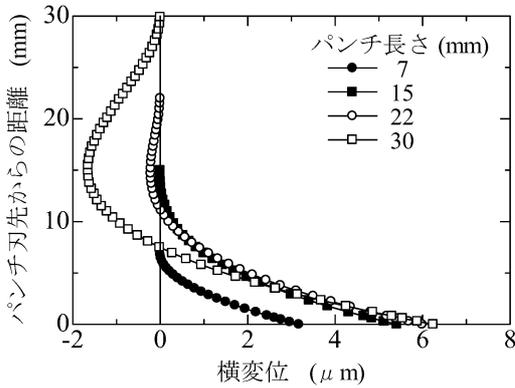
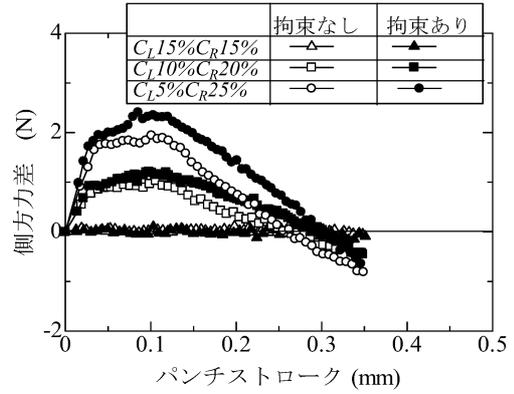
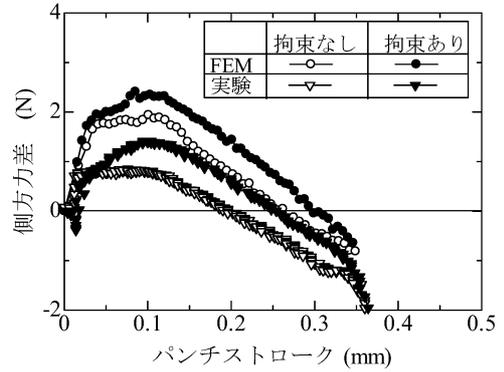


図13 パンチ長さの変形形状に及ぼす影響 (FEM, パンチストローク 0.35mm)

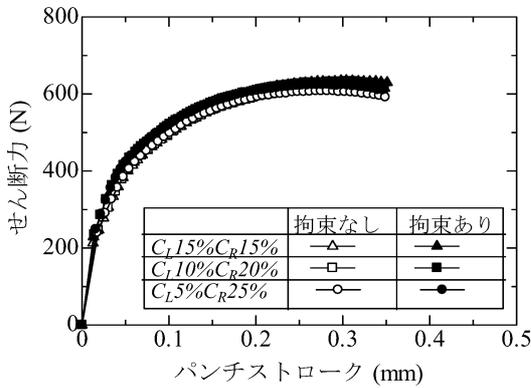


(a) 有限要素解析結果

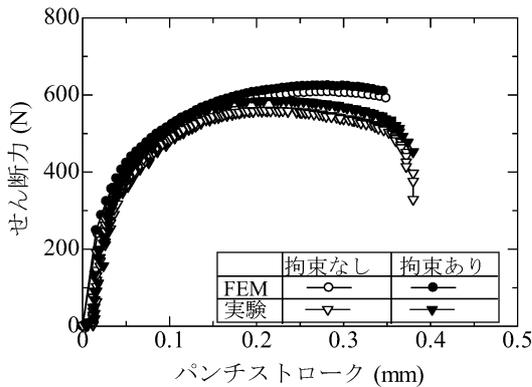


(b) 実験結果 (C<sub>L</sub>5% C<sub>R</sub>25%)

図15 側方力差への材料拘束の影響

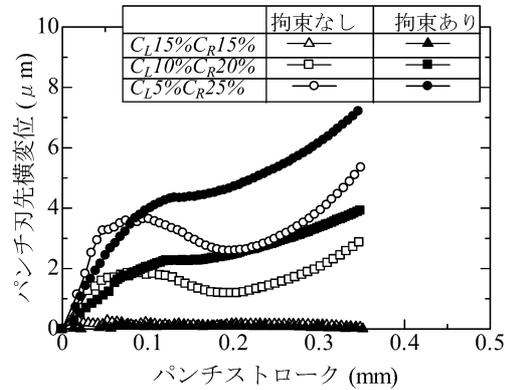


(a) 有限要素解析結果

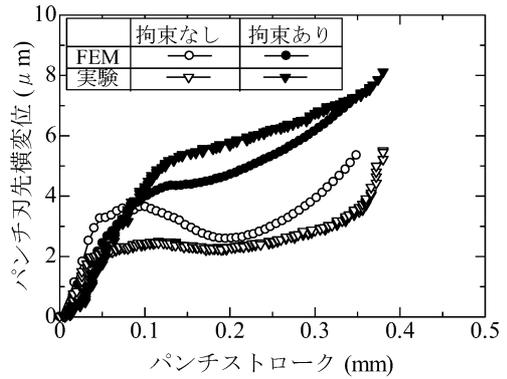


(b) 実験結果 (C<sub>L</sub>5% C<sub>R</sub>25%)

図14 せん断力への材料拘束の影響



(a) 有限要素解析結果



(b) 実験結果 (C<sub>L</sub>5% C<sub>R</sub>25%)

図16 パンチ先端横変位量への材料拘束の影響

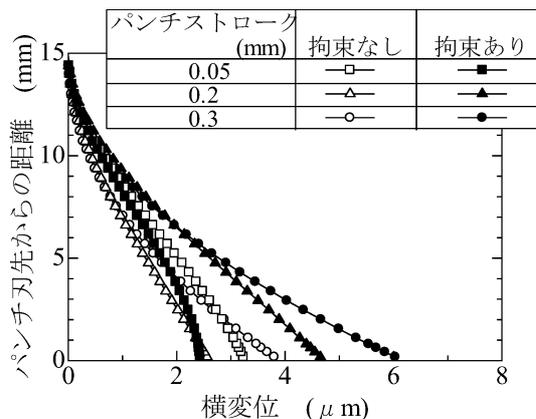


図 17 パンチ変形形状(FEM,  $C_L5\%C_R25\%$ )

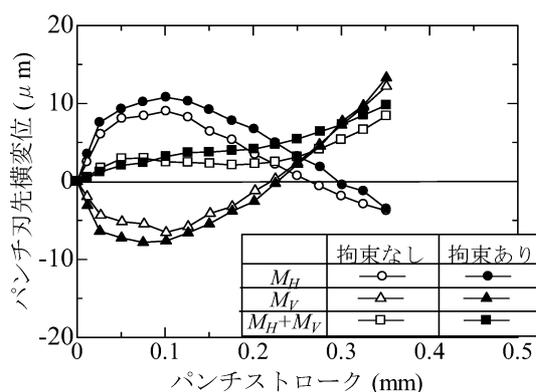


図 18 せん断力及び側方力差の変形に及ぼす影響 ( $C_L5\%C_R25\%$ )

ている。拘束有りの場合は、拘束無しの場合に比べて、せん断力が大きいことがわかる。拘束の有無に関係なく均等クリアランスでの側方力差は終始ほぼゼロである。他方、不均等クリアランスの場合、拘束することにより側方力差が増加することがわかる。

加工の進行に伴うパンチ先端横変位量を図 16 に示す。また、パンチ変形形状を図 17 に示す。被加工材端部を拘束することにより、不均等クリアランスの場合は是正量が大きくなる。また、クリアランス不均等が大きいほど、拘束の是正作用への影響が大きいことがわかる。

変形に及ぼす諸力の影響を定性的に把握するため、解析結果より抽出したせん断力及び側方力差を基に式(2)による変形量の算出した。 $M_H$ 及び $M_V$ から計算されるパンチ先端の変形を図 18 に示す。加工の進行に伴い、 $M_H$ に

よりパンチ変形は是正方向から反是正方向へ変化し、 $M_V$ による変形は反是正方向から是正方向へ変化する。また、 $M_H$ 及び $M_V$ による両パンチ変形へ拘束が影響を及ぼすことがわかる。

加工前半での $M_H$ によるパンチ変形は、被加工材端面の拘束により是正方向へ増加し、 $M_V$ によるパンチ変形は反是正方向へ増加する。加工後半は、 $M_V$ によるパンチ変形よりも $M_H$ によるパンチ変形へ及ぼす拘束の影響が大きいことがわかる。

以上のように、被加工材端面の変位拘束は側方力差及びせん断力に影響を及ぼし、パンチ変形へ影響を及ぼすことがわかる。被加工材端面の変位拘束により、是正作用の増加が期待できる。

#### 4 結論

微細精密せん断加工で期待される「偏心クリアランス是正作用」へのパンチ長さや板押えによる材料拘束の影響について、有限要素解析結果を中心に検討し以下の知見が得られた。

1. パンチ長さが異なる場合及び被加工材端面を板押えで拘束した場合のクリアランス是正作用は、せん断力と側方力差から生じるモーメントの曲げ作用で定性的説明が可能である。
2. 左右クリアランスが不均等な場合のパンチ変形へのパンチ長さの影響を明らかにした。ある程度の長さ以上にパンチを長くしても、先端の変形量はあまり増加しない。
3. 被加工材端面の拘束は、せん断力及び側方力差に影響を及ぼし、パンチ変形に影響を及ぼす。被加工材端面の拘束により、是正作用の増加が期待できる。

#### 謝辞

本研究の実施にあたり財団法人天田金属加工機械技術振興財団の奨励研究助成を賜りましたことを付記し、謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 前田禎三・銘苺春栄：塑性と加工，18-196(1977)，329-336.
- 2) 高橋俊典・青木勇：同上，36-409(1995)，155-160.
- 3) 青木勇・高橋俊典・斉藤啓・後藤明・坂本琴：同上，37-431(1996)，1316-1321.
- 4) 笹田昌弘・高良直希・青木勇：同上，47-549(2006)，968-972.