

静電容量型変位計による鍛造加工時の 工具変形量の測定

村田良美*

1 はじめに

塑性加工の際に工具に生じる応力、ひずみ、変形状態を知ることは工具設計、製品精度の面などから非常に重要である。このため従来から多くの理論的、実験的研究がおこなわれている。このうち工具-被加工材接触面における圧力分布については数多くの研究がおこなわれており、理論的研究としてはスラブ法、有限要素法などが、実験的研究としては、測圧ピン、感圧箔などが用いられている。測圧ピンによる接触圧力分布の測定は^{1)~3)}、すえ込み、押出し、圧延などあらゆる塑性加工について行われており、最近では、測圧ピンにより、圧力と摩擦応力を同時に測定できるセンサも開発されている^{4)・5)}。一方感圧箔をもちいての接触圧力分布の測定例も多く見られ⁶⁾、有用な情報が得られている。また、抵抗線ひずみゲージなどによる工具のひずみ分布の測定結果をもとに弾性FEMなどにより工具面圧力分布を計算した例もみられる^{7)~9)}。しかし製品精度と直接関係する工具-被加工材接触面の弾性変形を測定した例は非常に少ない¹⁰⁾。この理由として、実験技術的に、工具内面における微小な弾性変形を正確に測定することが難しいことがあげられる。本研究では、静電容量型変位計により工具-被加工材接触面の弾性変形の測定を試みる。電極間隔変化型の静電容量型変位計は、微小変位を高感度に測定できるが、出力の非直線性や零点調整が容易でない欠点がある。矢吹はこの欠点を電氣的に解消した高感度で直線性の良い静電容量型変位計を開発し¹¹⁾、これを圧延機の変位測定に適用した。本研究では、同形式の静電容量型変位計をもちいて、鍛造加工時の工具-被加工材接触面における工具弾性変形量の測定をおこなう。

2 静電容量型変位計による変位の測定原理

静電容量型変位計は、変位によって生じる静電容量の変化を電氣的に測定するものである。その構造は大きく分けて、図1に示す、電極間隔変化型、面積変化型、誘電率変化型の3通りに分けられ、それぞれの特徴を有する。電極間隔変化型は、微小変位の検出($< 1\mu\text{m}$)が可能であり、面積変化型は、大変位の測定($> 1\text{m}$)の測定ができる。また誘電率変化型は、接触部がないので、大変位の高速繰り返し測定に向いている¹²⁾。今回の工具変形量の測定に

は、微小変位の測定に適する電極間隔変化型の静電容量型変位計を用いた。

3 単純すえ込み加工の際の工具変形量の測定

3.1 変位計の構造および工具への装着

図2に、単純すえ込み加工の際のダイス形状、工具変形量の測定に用いた変位計の構造、およびダイス中心部における軸方向変位を測定する場合の装着方法を示す。図中のマイクロメータヘッドのスピンドル測定面が接地側電極、それに対向するりん青銅板が活動側電極であり、両者で平行板コンデンサを構成している。電極は偏心の影響が出ないように片方を大きくしてある。接地側電極にマイクロメータヘッドをもちいているのは、電極間隔の調整と出力のキャリブレーションを容易にするためである。ダイス中央に $\phi 1$ の穴がダイス表面より 1mm の深さまで開けられており、そこに鋼製の変位検出ピンが装着されている。この場合、ピンを装着するための穴をあけることにより工具に多少の外乱を加えることになる。またこの方法では、工具表面の変位ではなく 1mm 内側の変位を測定することになる。そこで軸対称弾性FEMにより、その影響を解析した。その結果、穴をあけたことによる影響およびダイス表面より内側の変位を測定することによる誤差は 1% 弱であり、測定精度に大きな影響を及ぼすことはないと考えられた。ダイス表面近傍の中心軸方向変位は、ピンを通してダイス上部に導かれ、絶縁材(ポリアセタール)を介してピンと一体に動きりん青銅製電極を軸方向に変位させる。それによって相対する接地側電極との間隔が変化し、コンデンサの静電容量も変化する。ダイスの中心軸方向の弾性変形量が静電容量の変化に、そして検出回路により電圧の変化に変換される。この際、絶縁材および電極の材質が検出ピンあるいは変位計の他の部分と異なり、熱膨張率も異なるため、厳密に考えると、温度上昇による電極間隔の変化が生じる。しかし1回の実験が短時間で終了すること、冷間加工であることなどから、今回の実験ではその影響を考慮しなくて

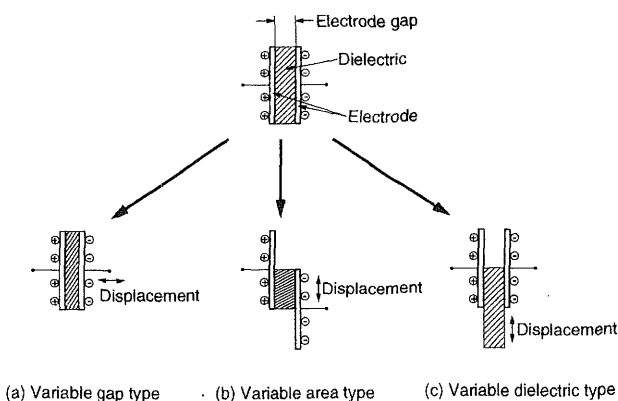


図1 静電容量型変位計の原理

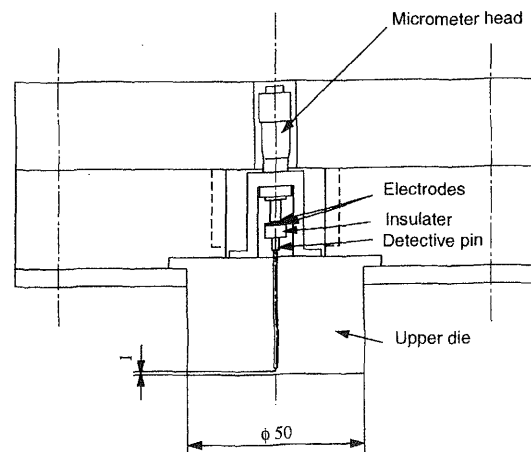


図2 ダイセットに組み込まれた静電容量型変位計

も特に問題ないとする。検出回路は、雰囲気安定させノイズやドリフトを減少させるために、電極近傍の工具内に組み込んである。変位計を組み込んだダイを上側ダイとして、同一形状の下側ダイと組み合わせでダイセットに取付け、実験をおこなった。平行ダイス間に円柱ビレットをはさみ、圧縮試験機により軸方向荷重を加え、工具の軸方向弾性変形量を測定した。荷重は市販のロードセルにより測定した。

3.2 変位計の出力特性の線形化および較正方法

図3に、図2の変位計の特性を示す。電極の接触点から所定間隔離した点で出力が零になるように検出回路を調整し、これを動作基準点とした。

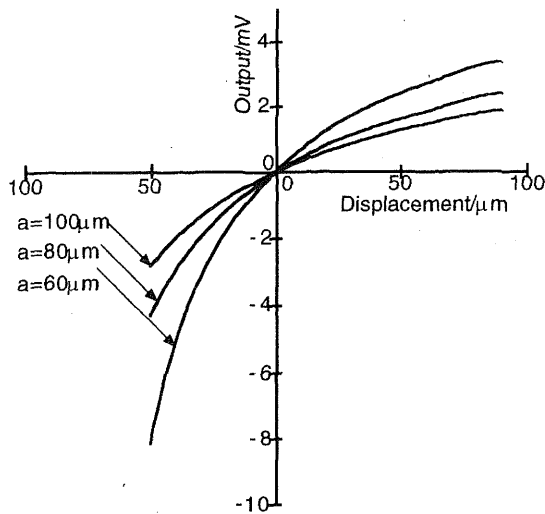


図3 変位計の特性

電極の対向面積を Scm^2 、電極間の比誘電率を ϵ とし、 $A = 0.0885S\epsilon$ とすると、静電容量 CpF と電極間隔 dcm との関係は、

$$C = A/d \quad (1)$$

となる。ここで変位計の零点の電極間隔を a 、その変化を x としたときの C の変化を y とすると、式(1)は次式のようになる。

$$y = Ax/(a^2 + ax) \quad (2)$$

図3の結果を式(2)にあてはめると電極の接触点近傍以外では式と曲線は良く一致する。変位の検出精度は、電極間隔と、 C 検出の分解能で決定される。電極については、式(2)を微分して得られる次式

$$dy/dx = A/(a+x)^2 \quad (3)$$

によって示されるように、電極間隔 $d = a + x$ が小さいほど感度、分解能が増すが、電極の平行度、平坦度の不良から設定可能な間隔には限界がある。今回の実験においては、基準電極間隔を $60\mu m$ に設定した。変位計の出力特性には長時間においては、電極などの温度特性の影響で電極間隔が変化し、測定値と比べて無視できないドリフトが生じる。非直線性があると、ドリフトによって零点が変動した場合、変位に対する出力特性が変化する。

したがって特性を直線化しておかないと零点変動の補正が非常に面倒になる。出力特性が直線の場合は、単に零点

の移動だけでよい。

式(2)が成立するのでこれを x について解いた

$$x = a^2 y / (A - ay) \quad (4)$$

を演算すれば、出力 y は変位 x に変換される。図4に、図3の曲線を線形化した結果を示す。時間的なドリフトの大きさは測定の絶対値と比較して無視できないが、線形化をおこなっているため、零点の位置を確認することができればドリフトの影響はない。

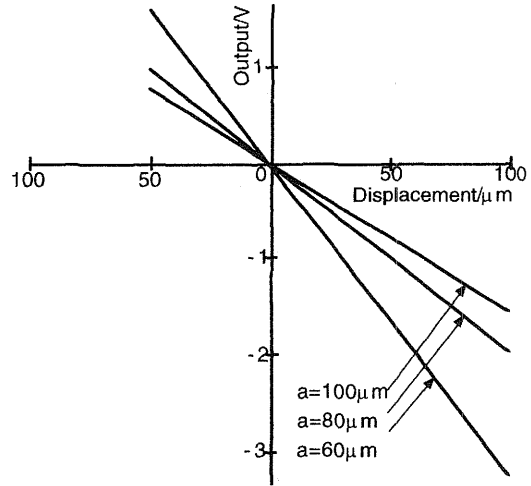


図4 線形化後の出力特性

3.3 単純すえこみ加工時の工具変形

まずアルミニウム円柱ビレットの単純すえこみ加工時の工具変位分布の検討をおこなった。ビレットはA1050Bの押出し材 (F材) の直径15mmのものから旋削により作成した。ビレット初期直径 D_0 は10mmに統一し、初期高さ比 $H_0/D_0 = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ の4通りについて実験した。ビレット端面の仕上げは旋削のままとし、無潤滑の条件で実験するためにダイス面とビレットを1回の加工ごとにアセトンで脱脂した。圧縮量がビレット初期高さの50%になるまで実験をおこなった。ビレット位置を中心から1mmづつ最大7mmずらして、工具変位分布を測定した。図5~8に、各初期高さ比のビレットの10%圧縮ごとの変位分布を示す。破線は、スラブ法による接触圧力分布の解析結果をもとに有限要素法により解析した結果であり ($r = 10, 30, 50\%$)、実線が静電容量型変位計による測定結果である。垂直方向の点線は、それぞれの圧縮率におけるビレット-ダイス接触端面の位置をあらわしている。解析結果は初期高さ比によらず中心に向かって変形量が増加する傾向を示す。一方実測値は、初期高さ比が0.5の場合は中心に向かって変位が大きくなる分布となっているが、初期高さ比が1.0と1.5の場合は、圧縮の初期から中期にかけて、中心より若干離れた位置で変位が最大になっている。初期高さ比が2.0の場合も、圧縮中期から後期にかけてその傾向がみられる。これは初期高さ比が大きいビレットをすえこむ場合に見られる凹型の接触圧力分布と関係があると考えられる。全般に、実測値の方が解析結果よりも小さめになっている。これは変位計取り付け部の弾性変形の影響と考えられる。図9に、圧縮率50%時の各初期高さ比のビレットの工具変位分布を示す。初期高さ比が小さいほど変形が厳しいため、工具側の弾性変形が大きくなるのがわかる。

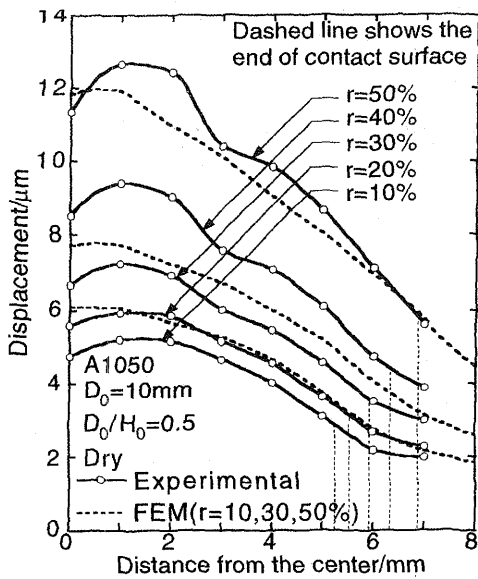


図5 ダイの圧縮方向変位分布 (A1050F, $H_0/D_0=0.5$)

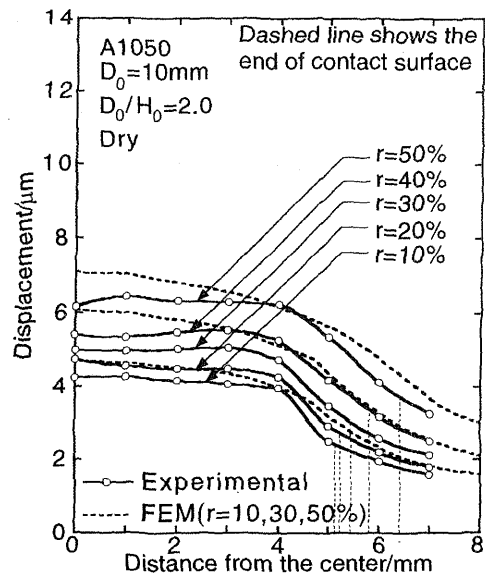


図8 ダイの圧縮方向変位分布 (A1050F, $H_0/D_0=2.0$)

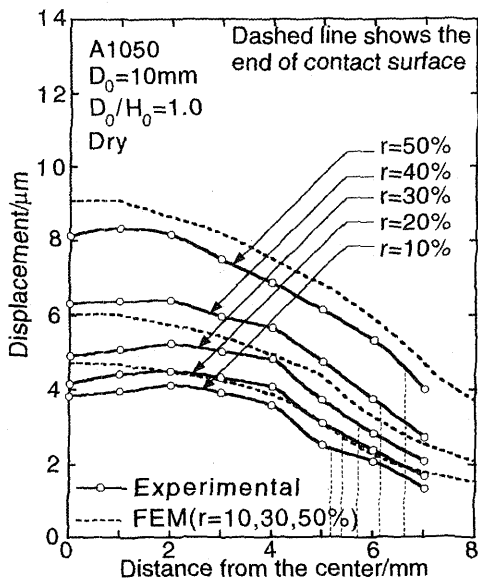


図6 ダイの圧縮方向変位分布 (A1050F, $H_0/D_0=1.0$)

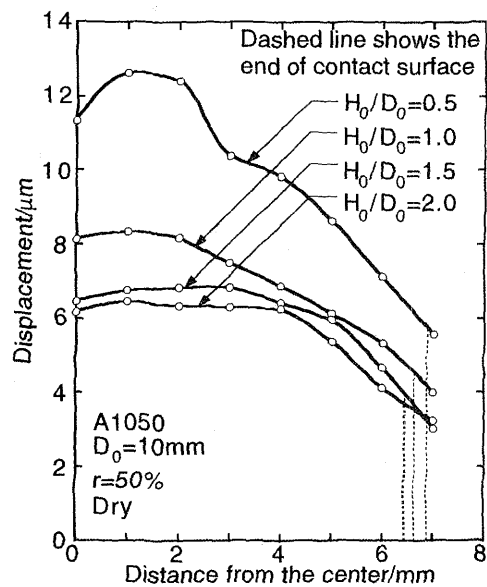


図9 ビレット径の変位分布に与える影響 (A1050F)

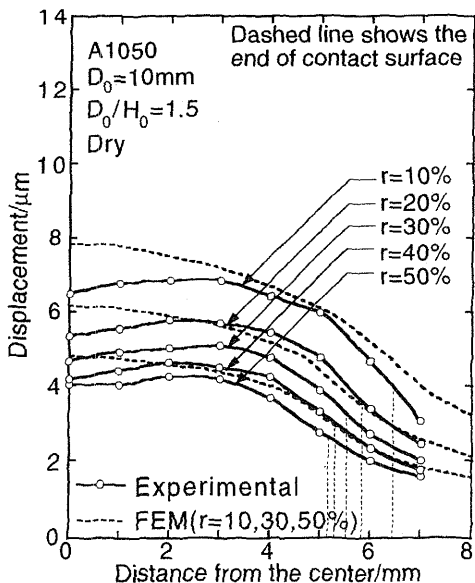


図7 ダイの圧縮方向変位分布 (A1050F, $H_0/D_0=1.5$)

4 後方押し出し加工のダイコンテナの弾性変形の測定

4.1 工具変位計の概要及び特性

単純すえ込みの工具変形量の測定に使用したものと同一タイプの静電容量型変位計により、後方押し出し加工のダイコンテナの弾性変形の測定を試みた。図10に、試作した工具変位計ユニットの構造を示す。鋼製の変位検出ピンが装着されており、その先端部でピンの中心軸方向の変位を検出する。ピンはコイルばねによって支持され、中心軸方向に測定対象に向かって押しつけられるようになっている。変位の測定には、すえ込み加工の場合と同様電極間隔変化型の静電容量型変位計を用いる。検出回路は、電気的なノイズや雰囲気の変化の影響を避けるためにユニット内に設置され、シールドカバーでおおわれている。すえ込み加工の場合と同様、リニアライザを用いて出力特性を電氣的に線形化した。このことにより出力が時間的に変化(ドリフト)しても基準点の位置を確認することができればドリフトの影響を考慮する必要はない。変位計の特性は基準電極間隔 a の値により変化するが、今回の実験では $a = 100 \mu\text{m}$

とした。時間的なドリフトの大きさは測定の精度に影響を及ぼすと考えられるが、すえ込み加工の場合と同様測定時

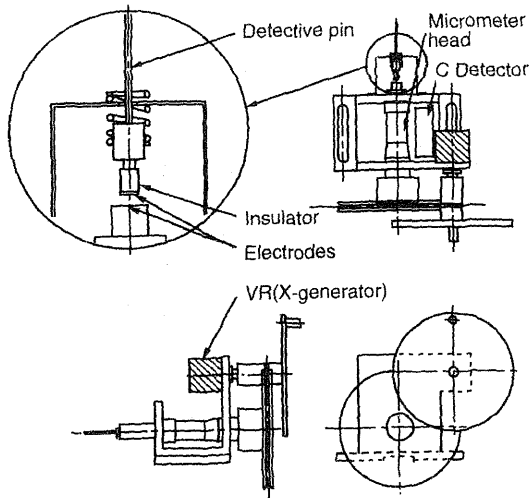


図10 変位計の構造

間が短く、また線形化を行っているので、零点の位置を確認することができればドリフトの影響はない。また変位計に可変抵抗器とプーリを用いたキャリブレーションユニットが取り付けられており、実験前後に適宜キャリブレーションを行うことにより測定値の信頼性を高めた。

4.2 後方押しへの適用と実験装置

試作した変位計により、後方押しにおけるダイコンテナ内面の垂直変位の測定を行った。図11に、後方押し実験装置の構成と変位計の取り付け位置を示す。今回の実験では、カップ状容器の後方押しをその対象とした。使用する工具のうち試験片と直接接し、条件の厳しいダイス、ポンチ、カウンターポンチにはSKD11（1050℃油焼き入れ、250℃1時間焼き戻し、研削仕上げ）を用いた。ダイス内径を16、外径を80（内外径比=5）、高さを48とした。またポンチには平頭ポンチを用い、ランド幅3mm、先端部コーナー $r=0.2$ 、直径は10、12、14の3通りとした（断面減少率39.1%、56.3%、76.6%）。ダイコンテナには、90度毎に半径方向に直径1mmの穴がコンテナ内面より1mmの深さの位置まで開けられており、この穴に変位計の検出ピンが装着される。変位測定ユニットは、ダイセットに4本のボルトにより固定されたユニット台上に2本のボルトで締め付けられている。1回の実験で同時に4点の変位を

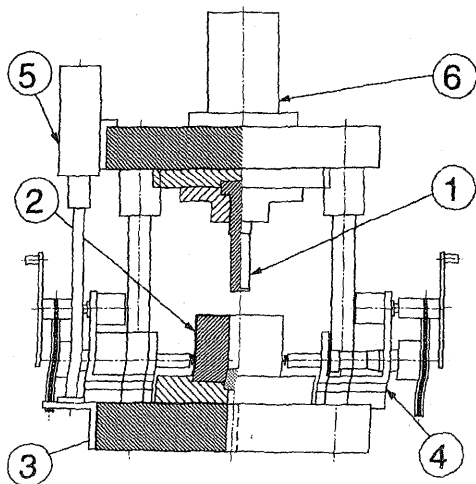


図11 後方押し実験装置

測定することができる。今回の実験では、測定点の高さはダイコンテナ中央より $\pm 2. \pm 6\text{mm}$ の各点としている。カウンターポンチの高さを変えることにより、ダイ内壁の様々な位置における半径方向変位を測定した。ポンチのストロークは誘電率変化型静電容量型変位計により、また加工荷重はひずみゲージ式ロードセルにより測定した。加工は、加工速度や変形熱の影響を避けるため準静的とし、アムスラー型油圧圧縮試験機のパルプを手動で調節することにより0.5mm/min程度とした。試験片として純アルミニウム押し材（A1050BEH112）を使用した。試験片は、 $\phi 20$ の丸棒状素材を旋削して $\phi 16$ の円柱状に仕上げた。試験片初期高さ H_0 は12、16、20の3通りとした。潤滑については、試験片をアセトンで脱脂後、ジョンソンワックス#111に浸漬し、室温で1日以上自然乾燥させたものを用いた。

4.3 測定例

予備実験の結果、静電容量型変位計の出力より求められた半径方向工具変形量の絶対値が予想されるよりかなり大きめの値となることが判明した。そこで実験装置に被加工材を入れずにポンチとカウンターポンチを直接接触させ、垂直荷重のみををかけて、変位計の出力を測定した。その結果、被加工材が存在せず、ダイコンテナ内側面に接触圧力が加わらない時でも変位計に垂直荷重に比例した出力が出るのが分かった。これは、変位計を固定しているダイセットが垂直荷重により弾性変形し、それにともない変位計ユニットがダイセットの中心方向に倒れ込み、変位計のギャップが変化することが主な原因と考えられる。そこで変位計の出力は、垂直荷重による変位計の基準のずれによる成分と工具-被加工材接触面での圧力による弾性変形を重ね合わせたものと考え、加工時の垂直荷重による変位計の出力成分を差し引く補正をおこなった。図13~15に、断面減少率 $r=76.6\%$ （ポンチ径14mm）で、被加工材初期高さ $H_0=12, 16, 20\text{mm}$ の、ポンチストローク（図12参照）2mmごとのダイス各位置における半径方向変位を示す。変位のデータは、カウンターポンチの高さを変化させて行った複数の実験結果をまとめたものである。各実験ごとに加工荷重が異なり、また厳密には被加工材のダイコンテナ内部での相対的な位置も異なるため、正確に同一条件とはいえない。データには多少のばらつきが見られるが、変位はおおむね被加工材の中央部近傍で最大となり、両端部に行くほど小さくなっていることが分かる。変位が最大となる位置は、ポンチが下降するのにもなって下がっている。またポンチが通過した後では変形量が小さくなっていること、ダイ底部では変位があまり変化しないことが分かる。被加工材の初期高さが大きいほど変位の最大値が大きくなっている。これは圧力の加わる範囲が大きいためと考えられる。 $H_0=16, 20\text{mm}$ の場合は、最下部での変位が測定範囲の中で最小となっている。これは押し残り厚さが大きい底部に加工の影響が及びにくいいためと考えられる。逆に $H_0=12\text{mm}$ の場合最下部での変位が最小ではなく、またその絶対値も $H_0=16, 20\text{mm}$ の場合と比べて一番大きくなっている。これは押し残り厚さが少ないため加工の影響が底部まで及びやすいためと考えられる。

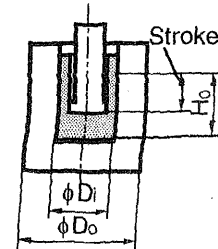


図12 ポンチ、ダイスの形状

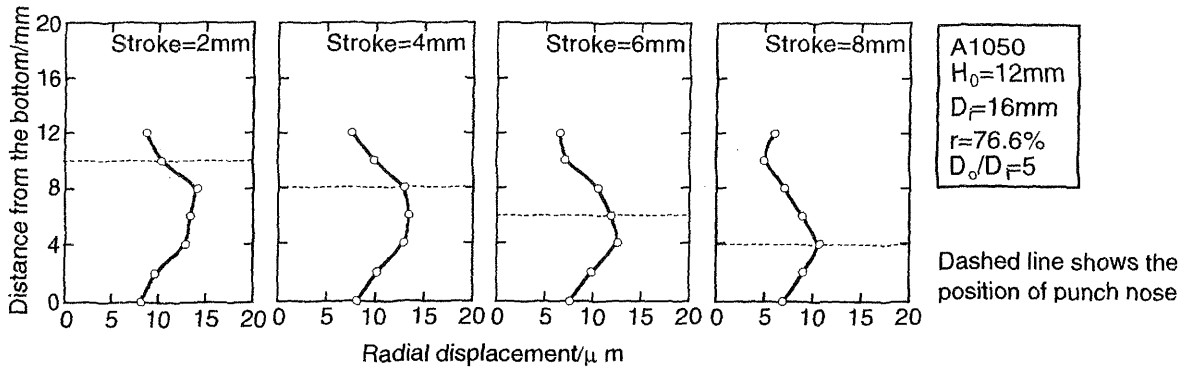


図13 ダイコンテナの変位分布 ($H_0=12, r=76.6\%$)

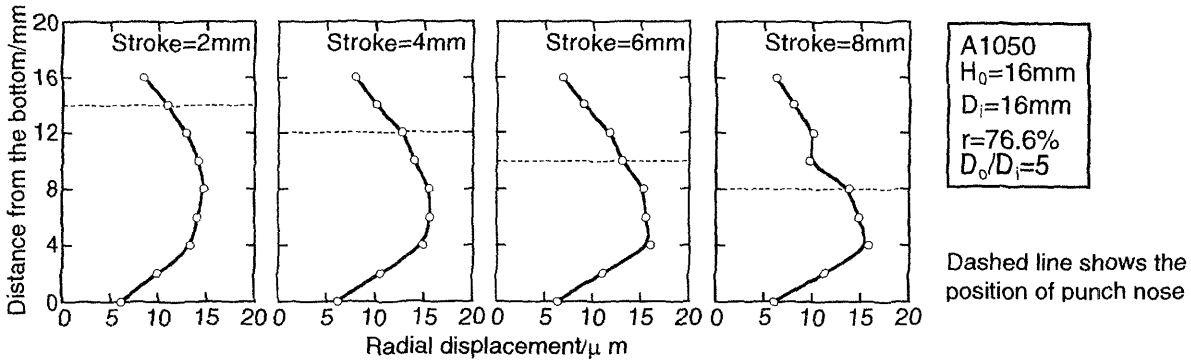


図14 ダイコンテナの変位分布 ($H_0=16, r=76.6\%$)

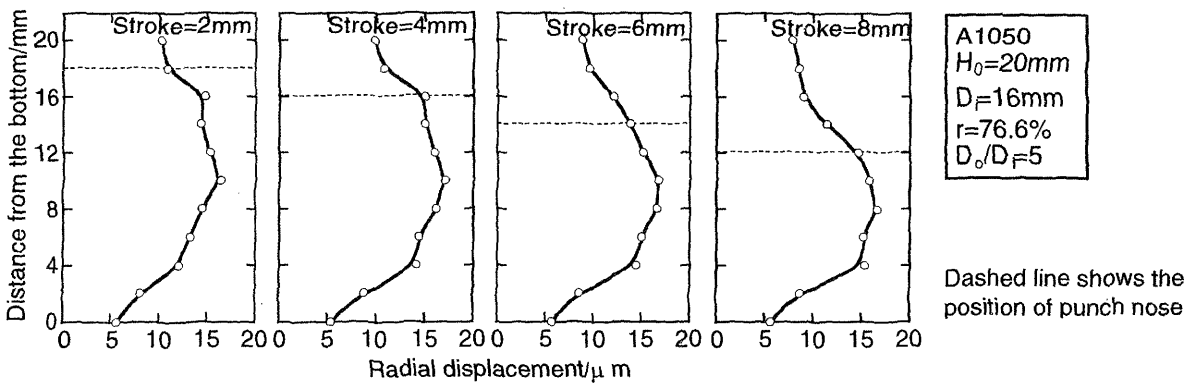


図15 ダイコンテナの変位分布 ($H_0=20, r=76.6\%$)

5 まとめ

(1) 線形化した電極間隔変化型静電容量型変位計による工具-被加工材接触面の弾性変形の測定法を提案した。円柱圧縮への適用では、工具中心部に向かう変形量の増加傾向とは多少異なる測定結果が得られた。これは実際の接触圧力分布が単純なフリクションヒルとは異なる分布形状となることと対応していると考えられる。また実測値は、理論値に比べ若干小さめの値を示すが、これは変位計取り付け部の弾性変形の影響と考えられる。

(2) 静電容量型変位計を冷間後方押し出しのダイコンテナ内面の変位測定に適用した。変位計の出力に対する垂直荷重の影響を取り除いて結果を整理した。得られた結果は従来の知見から見て妥当なものであった。しかし垂直荷重による変位計出力への影響の取り扱い方法の検討及び、変位計の支持方法の改良などによる影響自体の除去が今後の課題である。

終わりに、本研究の一部は財団法人天田金属加工機械技術振興財団から研究助成を受けてなされたものであることを記し、深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、戸沢康壽、中村雅勇、加藤隆、石川孝司、井上健次：塑性と加工、21-238(1980)、999
- 2) 高橋壯治：塑性と加工、6-52(1965)、271
- 3) 高橋壯治：塑性と加工、9-84(1968)、30
- 4) 米山猛・畑村洋太郎：日本機械学会論文集（C編）52-481、2551
- 5) 畑村洋太郎・米山猛：日本機械学会論文集（C編）53-495、2392
- 6) 松原茂夫・工藤英明：塑性と加工、32-364(1991)、589
- 7) 木原淳二・牧野浩明、申光憲：塑性と加工、25-284(1984)、806
- 8) 小島之夫・森川裕彦・水野高爾：塑性と加工、26-295(1985)、855
- 9) 高辻則男・時沢貢・室谷和雄・松木賢司・山林稔治：塑性と加工、29-325(1988)、159
- 10) Pawelski, O. & Armstroff, O.: Arch. Eisenhüttenwesen, 38-7(1967), 527
- 11) 矢吹豊：塑性と加工、26-295(1985)、842
- 12) 鈴木弘編：塑性加工（装華房）