

# 形状フィードバック型金型再生加工システムの開発

豊田工業大学大学院 工学研究科

助教授 古谷克司

(平成 8 年度研究開発助成 AF-96023)

キーワード: 放電加工, 加工精度, 机上計測

## 1. 研究の背景

製品の高精度化, 多様化に伴い, 構成部品の要求精度は高くなってきている。代表的な生産手段である金型にも, 当然高精度が要求される。機械加工において高精度な加工を実現するためには, 加工中に加工物の形状や工具の消耗を計測することが有効である<sup>1)</sup>。しかし, 現状の金型製作においては, 加工プロセスと計測プロセスが独立している場合が多い。マシニングセンタに代表される切削加工プロセスでは, タッチプローブを使用したPoint-to-point(PTP)計測であるオンザマシン計測が報告されているが, 精度と能率の問題が残っている。測定能率の向上に対しては, 変位検出型プローブを用いた連続型オンザマシン計測が報告されている<sup>2)</sup>。いずれの場合も仕上げ形状の手前の段階で測定プロセスを繰り返し, そのデータをフィードバックし要求形状に仕上げる手法である。この場合, 除去し過ぎた形状に対しては, 同一機械上で修正を行うことは困難である。

また, 金型では, 鍛造型のように使用中ある一部分だけに摩耗あるいは欠けが生じる場合が多い。このような場合にも, 対象箇所に対して修正加工が簡単に行えるなら, 金型の補修時間を大幅に削減することが可能になると考えられる。

## 2. 研究の目的

申請者らは, これまで放電加工機に対して適用した机上三次元形状測定装置および基準を必要としない形状評価法を開発してきた。また圧粉体電極を使用した放電加工において, 厚さ数mmの堆積加工も可能な放電表面処理の研究を進めてきた。本研究ではこれらの技術を統合することにより, 精密加工システムを構築することを目的とする。

## 3. システムの基本概念

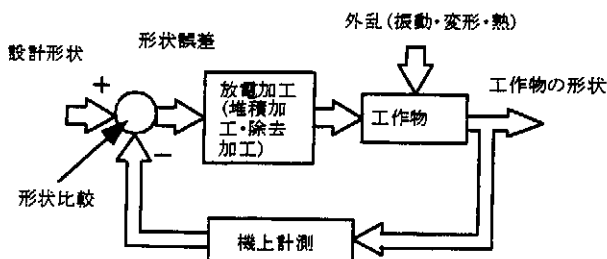
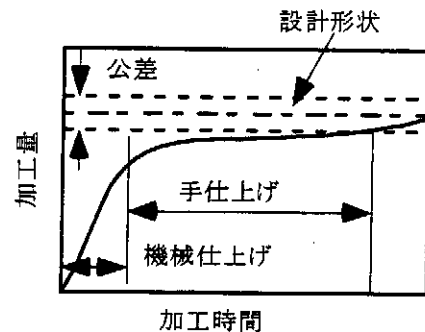


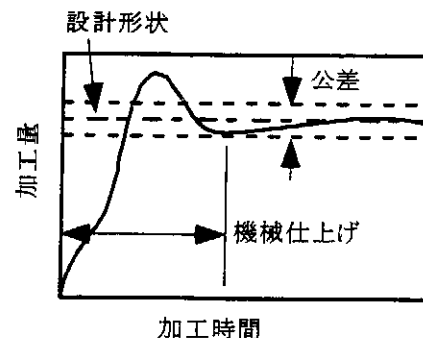
図 1 形状フィードバック型精密加工システムの概念

位置決め制御においては, 制御対象の位置をフィードバックすることで高精度な位置決めを実現している。この考えを加工システムに導入した場合の概念図を図1に示す。本システムにおいては, 位置決め制御の目標位置に対応するものが設計形状であり, 制御対象は被加工物の形状となる。また, 位置決め制御のコントローラに当たる部分が工作機械になる。このコントローラ部では, 形状測定の結果により除去加工と付加加工を使分ける必要がある。フィードバック要素は被加工物の形状を測定する机上計測装置である。したがって, このようなシステムを形状フィードバック型加工システムと呼ぶことにする。

図2にこれまでの加工システム(a)と提案する新しい加工システム(b)の違いを示す。縦軸は加工量, 横軸は加工時間を示し, 目標仕上げ形状までの除去量の推移を模式的に示したものである。(a)に示す従来の加工システムでは, 最終仕上げ形状の手前の段階で機械加工を終了し, その後は手仕上げにより形状を仕上げるため加工時間が長くなる。机上計測のデー



(a)従来のシステム



(b)形状フィードバック型精密加工システム  
図 2 システムの比較

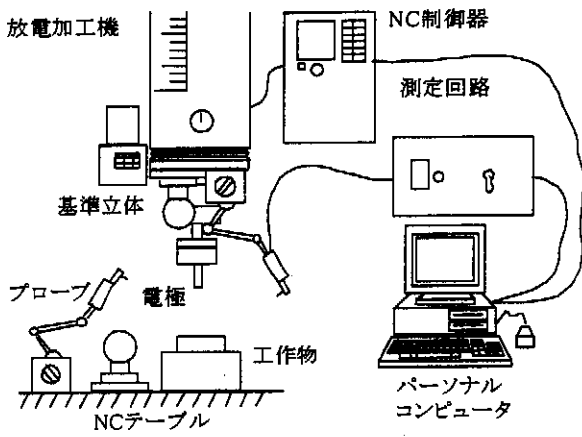


図3 基準立体を用いた机上測定装置

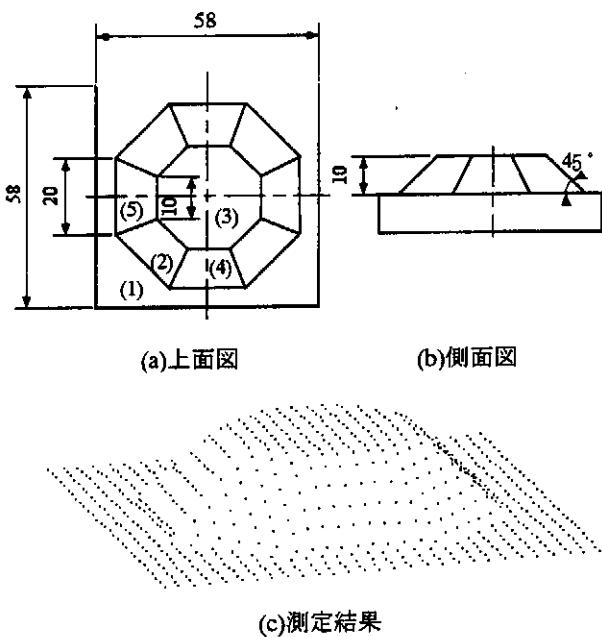


図4 被測定形状と測定結果

タをフィードバックすることにより手仕上げの量を少なくすることは可能であるが、手仕上げ行程を無くすことは困難である。これは、除去しすぎた形状に対する修正加工が同一機械上では困難であり、取り代を残した形状で機械加工を終えているためである。一方、提案する加工システムでは、(b)に示すように同一機械上での形状修正加工が可能であるため、除去しすぎた形状に対しても対応することが可能である。加工中の形状を監視して設計形状との偏差をフィードバックしながら除去加工と付加加工を繰り返すことにより、機械加工だけで目標形状に仕上げることが可能となる。そのため、従来の手仕上げ行程を含むシステムに比較して短時間で形状を上げることが可能である。

#### 4. 形状フィードバック型精密加工システムの構成要素

本システムの重要な要素技術は、机上計測システム、形状評価システム、放電加工による堆積加工の3つである。本研究

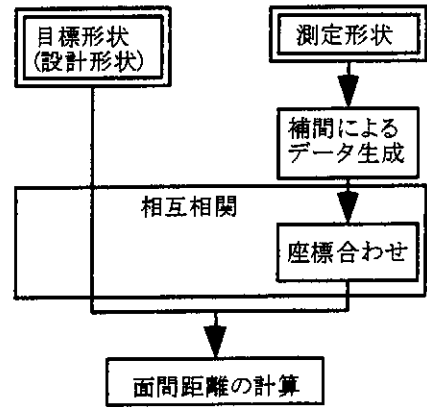


図5 形状比較のアルゴリズム

ではまずこれらの精緻化を行った。

#### 4.1 机上形状計測システム

使用した机上形状測定システムは、球体を校正基準として用いる計測システムである<sup>4)</sup>。図3に放電加工機に適用した場合の机上計測システムの構成を示す。測定プローブには、粗さ計のスタイラスを用いている。このスタイラスを、ワークを計測する場合には主軸側に、工具電極を測定する場合はNCテーブル上に設置し測定する。そのときスタイラス針先端の位置を校正するために、基準球体を用いる。このスタイラスは、保持アームにより任意の姿勢に固定することが可能なため、オーバーハングするような形状も測定可能である。測定精度を向上させるために、プローブ軸と測定面の法線とが一致するようにスタイラスの姿勢を設定する測定は、PTP方式、スキニング方式による自動計測が可能である。

放電加工機上で実際に測定した結果を、設計形状と合わせて図4に示す。測定ワークは切削加工後、放電加工によるカッターマークを除去する加工を行ったものである。測定はPTP方式、姿勢変更回数11回、測定点数は865点である。図に示す測定結果と、市販の三次元座標測定機による測定結果の比較を表1に示す。比較した部位を図4の設計形状の(1)から(5)に示す。面間距離、面間角度とも、三次元座標測定機による測定結果と同様の結果が得られている。

#### 4.2 形状評価法

提案する形状フィードバック型加工システムにおいては、測定された加工途中の形状を設計形状と比較評価する必要がある。通常、三次元形状を設計形状などと比較する場合は、基準を設ける必要がある。しかしながら、加工途中の形状では基準を持たない場合が多い。申請者はこれまで、基準を持たない形状に対しても形状評価が可能な汎用性のある評価方法の検討を行ってきた<sup>6)</sup>。この評価法は、最適な位置への位置合わせを行った後、両者の面間距離を計算することで形状評価を行う。位置合わせは、設計形状と測定形状を曲面によるデータ補間を用いた曲面要素で表し、両形状の相互相関を計算し、相関が最も高くなる位置へ比較形状を座標変換することで行う。相互相関の計算はFFTを使用し高速化を図っている。近似曲面にはGregoryの手法によるパッチ<sup>7)</sup>を用いた。

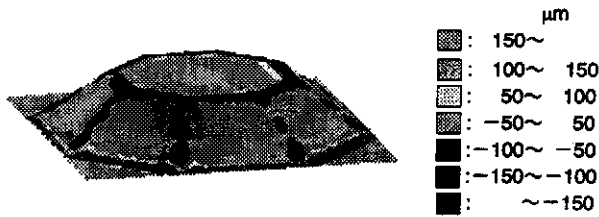


図6 形状評価の例

評価アルゴリズムを図5に示す。位置合わせの計算は、はじめに比較形状をあるデータ幅でシフトさせ相互相関関数を計算し相関が最大となる位置を探索する。次にその位置の近傍に対しシフト量を小さくして相互相関関数の最大となる位置を探索する。この操作を繰り返すことで、精度良く短時間に位置合わせを行うことが可能となる。図6に設計形状と測定形状の面間距離の分布を示す。この図は、10 $\mu\text{m}$ ピッチで位置合わせを行った後、両者の面間距離を計算したものである。放電加工により形状を仕上げているため稜線部が多く除去されていること、斜面すそ部は切削時の切り残しのため除去されていないことが確認できる。

#### 4.3 付加(堆積)加工

申請者らがこれまで開発した圧粉体電極を使用した放電表面処理技術を用いれば、放電加工機上で除去加工と付加加工を使い分けることが可能である。放電加工は、通常は除去加工を主目的として使用される。しかし、消耗の激しい圧粉体電極を使用し、さらに消耗電気条件で加工を行えば、消耗した電極材料が相手材表面に堆積することが確認されている<sup>9)</sup>。例えば、タングステンカーバイドとコバルトを重量比7対3で混合した圧粉体を用いて加工を行うと、厚い堆積層を得ることができる。炭素鋼に対して上記加工を行い、厚さ1mmの堆積層を得たワークを図7に示す。さらに加工時間を長くすることにより、厚さ数mmまで堆積できることを確認している。

また、形状フィードバック型加工システムにおいては、ある一部分だけ付加加工を行いたい場合が生じる。図8に示すように、直径0.1mmのタングステン電極で比較的大きな加工条件で加工を行うと、工作物側に高さ100 $\mu\text{m}$ 程度の堆積層を得ることができることも確認している。この手法を用いれば、マイクロマシニングにおける形状フィードバック型精密加工システムを実現することも可能であると考えられる。

圧粉体を用いた方法の他に、タングステン細線を用いる方

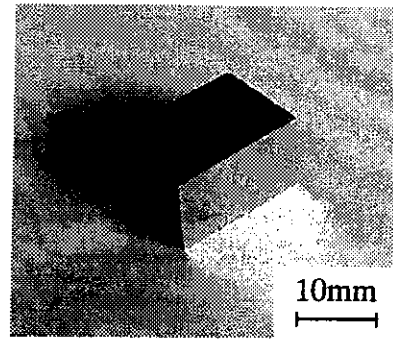


図7 圧粉体電極を用いた堆積加工

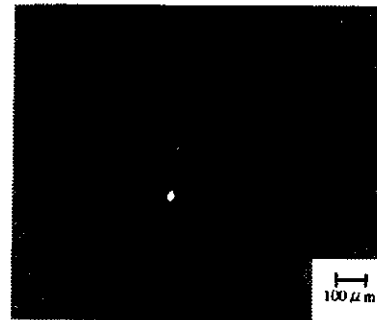


図8 細線電極を用いた付着加工

法<sup>9)</sup>やチタン粉末を混入した加工液を用いた方法<sup>10)</sup>でも堆積加工が可能であることを申請者らは確認している。

またMaddenらにより、電解加工を使用しても付加加工が可能であると報告されている<sup>11)</sup>。したがって、今後はこの方法の適用も検討する必要があると考えられる。

#### 5.形状修正加工

##### 5.1 平板に対する形状修正加工

放電加工による付加加工を利用して、実際に形状修正加工の可能性を確認した。一つの例として次のような加工を行った。はじめに、平板に対して切削加工を行いカットマークを付けておく。これは、形状誤差に相当する。次に放電加工機に移し、付加加工(堆積加工)をカットマークが十分埋まる程度に行う。最後に余分な部分を除去する修正仕上げ加工を行い、カットマーク上部に合わせた平坦な面を作成する。修正仕上

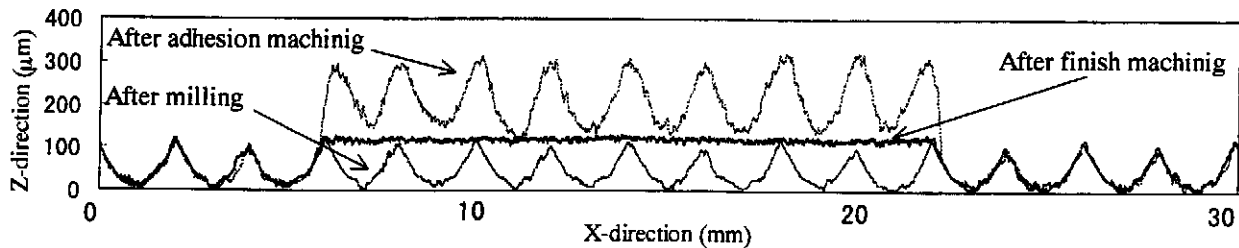


図9 平面に対する加工の例

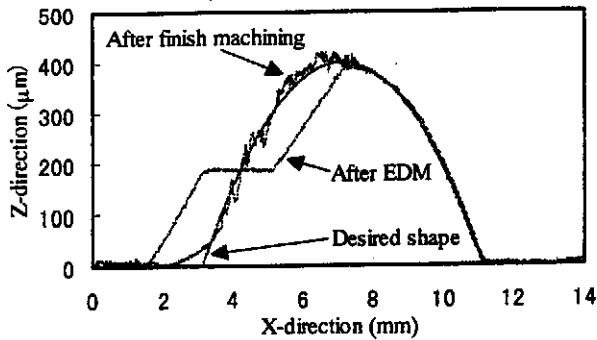


図10 2次元形状の加工例

げ加工には、通常放電加工で用いる銅電極に交換して行った。切削加工は、直径10mmのボールエンドミルを使用し、ピックフィード2mmにて行った。この条件におけるカットマークの理論高さは100 $\mu$ mであり、実際にその程度になっていることを確認している。

切削加工後、堆積加工後、修正仕上げ加工後の各断面プロファイルを重ねて図9に示す。図より、高さ100 $\mu$ m程度のカットマーク数本が平坦に形状修正されていることが確認できる。この時の堆積、修正加工の全加工時間は15分であった。堆積加工では電極消耗の大きな条件を使用しているため、ワークのカットマーク形状が電極に転写される。その結果、堆積加工後の形状はカットマーク形状にならった形状になっている。今後、修正仕上げ加工条件をさらに検討することで、この程度の形状修正であれば数分で修正が可能である。修正加工後の面粗さは25 $\mu$ mRz程度であった。これは、圧粉体電極による堆積層が空孔を多く含んだ層になっているためである。表面処理被膜として使用するには、加工条件を変更し、銅電極で放電加工を行い溶解、再凝固させることで空孔を減少させ、面粗さを向上させる手法を見いだしている。この2次処理を行えば、処理面の面粗さは数 $\mu$ mRz程度まで向上することを確認している。本報告では、形状修正が可能であることを確認することを目的としたため、2次処理は行わなかった。

### 5.2 2次元断面形状に対する形状修正加工

平板に対する修正加工では、形状測定データによるフィードバック加工は行っていない。そこで、2次元断面形状を有する形状の加工を想定し、実際に測定データをフィードバックした修正加工を試みた。目標とする断面形状を図10中に示す。円弧の一部であり、最大高さ400 $\mu$ mの形状を想定した。この目標形状に対し、はじめから大きく形状誤差を含んだ電極形状を製作し、その電極を用いてワークに対し放電加工を行った。加工後のワーク断面形状を図10中に示す。図から分かるように、左半分に除去しすぎた形状と追加加工が必要な形状が確認できる。このデータを基に堆積、修正加工を繰り返し、目標形状に仕上げる加工を行った。修正加工には、直径2mmおよび直径0.2mmの銅電極を使用した。修正の途中で形状計測を繰り返し、そのたびに形状を確認している。今回行った形状修正加工の最終的な断面形状を図10中に合わせて示す。今

回は使用した放電加工機のサーボ機構の制限により、仕上げ形状に倣ったスキヤニング加工を行っていない。そのため、目標形状に対し形状誤差 $\pm 20\mu$ m程度になった。しかし、測定データをフィードバックすることにより、2次元断面形状を有する形状に対しても修正加工が可能であることが確認できた。

### 6.まとめ

機上形状計測システム、形状評価システム、放電表面処理技術を統合化した形状フィードバック型精密加工システムの基本概念について述べた。また、形状修正加工の例として、平板に対する修正加工を行い、深さ100 $\mu$ m程度の数本の溝を加工時間15分で修正できることを確認した。さらに、2次元断面形状を有する形状に対して、測定データをフィードバックした形状修正加工を行い、実際に形状を仕上げるのが可能なことを確認した。今後は、3次元形状に対し、スキヤニング加工を組み合わせた形状仕上げを行い、より精密な加工を目指す予定である。

### 5.3 形状誤差の加工精度からの検討

細線電極を用いた垂直加工を繰り返すことによる形状誤差を実験的に検討した。ボールエンドミルを使用した切削加工においては、その工具半径 $R$ とピックフィード $f$ により、理論粗さ $(f/8R)$ が求められている。今回用いた細線電極による仕上げ加工においても、電極先端が消耗して丸くなることを考えると、電極系と横方向送り量により形状誤差が決定されると考えられる。そこで、直径0.5mmの電極を用いて平板(S50C)に対する垂直加工を繰り返し行い、その時の断面形状を測定した。比較のため、直径1mmの電極による加工も行った。加工深さは電極直径と同じ値(0.5mm, 1mm)とし、電気条件は仕上げ加工条件を用いた。電極の横方向送り量は、電極径の1/2(0.25mm)とした。

直径0.5mmの電極の先端半径を0.25mmと仮定し切削加工における理論粗さを計算すると31 $\mu$ mとなる。実測値では40 $\mu$ mとなった。直径が1mmの電極を用いた場合には角部のみが丸まっているため球と近似することは困難である。しかし、電極径情を重ねあわせたような形状になっており、実測値では41 $\mu$ mであった。

これらのことから、前節の実験で得られた粗さは妥当な値であると考えられる。

### 謝辞

本研究は豊田工業大学大学院・毛利尚武教授、太田勝助手との共同研究である。また、実験を遂行するに当たり同博士課程・武沢英樹氏、同修士課程修了生・岩本謙治氏(現、(株)不二越)、藤井一隆氏(現、(株)ゼクセル)にご協力頂きました。記して感謝いたします。

### 参考文献

- 1) 高下二郎: 自動計測機能付きマシニングセンタ, 精密工学会誌, 54, 4 (1988) 647.

- 2) 垣野義昭, 岩田義雄, 岩崎嘉徳, 松原厚, 大坪寿:加工形状誤差の偏差検出型オンザマシン計測に関する研究, 精密工学会誌, 58, 6 (1992) 1059.
- 3) 垣野義昭, 井原之敏, 岩崎嘉徳, 松原厚, 大坪寿:除去加工用修正加工システムに関する研究(第1報), 精密工学会誌, 59, 10 (1993) 1689.
- 4) 古谷克司, 岩本謙治, 毛利尚武, 球体校正法による機上三次元形状計測(第1報), 精密工学会誌, 63, 12 (1997) 1769.
- 5) 古谷克司, 岩本謙治, 毛利尚武, 球体校正法による機上三次元形状計測(第2報), 精密工学会誌, 64, 1 (1998) 79.
- 6) 武沢英樹, 岩本謙治, 古谷克司, 毛利尚武, 山根道敏, 東正毅:曲面による補間を用いた形状評価, 1997年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1997) 428.
- 7) G. Garin: Curves and Surfaces for Computer Aided Geometric Design, A Practical Guide, 3rd ed., Academic Press, Boston (1993) 376.
- 8) N. Mohri, N. Saito and Y. Tsunekawa: Metal Surface Modification by Electrical Discharge Machining with Composite Electrode, Annals of CIRP, 42, 1 (1993) 219.
- 9) N. Mohri, K. Fujii, K. Furutani, H. Takezawa and T. Sata: Material Accretion by Electrical Discharge Machining with Thin Electrodes, Proc. Int. Conf. Improving Machine Tool Performance, 2 (1998) 829.
- 10) 実藤晃則, 古谷克司, 三宅英孝, 太田勝, 毛利尚武:粉末混入加工液による放電堆積加工(第1報), 1999年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1999) 417.
- 11) D. Madden: Three-Dimensional Microfabrication by Localized Electrochemical Deposition, J. Microelectromechanical Systems, 5, 1 (1996) 24.
- 工用エンドエフェクタの開発, 精密工学会誌, 63, 5, pp. 721-725 (1997).
- (2) K. Furutani et al.: Simultaneous Finishing a Pair of Dies by Electrical Discharge Grinding, Rapid Product Development, pp. 263-272 (1997).
- (3) K. Furutani et al.: Three-dimensional Shaping by Dot-matrix Electrical Discharge Machining, Prec. Eng., 21, 2-3, pp. 65-71 (1997).
- (4) 古谷克司ほか:インパクト駆動機構を用いた自走式放電加工機, 精密工学会誌, 63, 9, pp. 1290-1294 (1997).
- (5) 古谷克司ほか:ドットマトリクス方式を用いた放電加工による3次元形状創成加工法(第2報)—放電分散の観察—, 精密工学会誌, 63, 11, pp. 1553-1557 (1997).
- (6) 古谷克司ほか:球体校正法による機上三次元形状計測(第1報)—測定原理および測定精度—, 精密工学会誌, 63, 12, pp. 1769-1773 (1997).
- (7) 古谷克司ほか:球体校正法による機上三次元形状計測(第2報)—受動関節を持つプローブ保持用多自由度アーム—, 精密工学会誌, 64, 1, pp. 79-83 (1998).
- (8) K. Furutani et al.: A Parallel Link End Effector for Scanning Electrical Discharge Machining Process, Precision Engineering, 22, 3, pp. 131-140 (1998).
- (9) 古谷克司ほか:ローカル・マシニング・ステーション方式による放電加工, 精密工学会誌, 65, 2, pp. 224-228 (1999).
- (10) 武沢英樹, 古谷克司ほか:形状フィードバック型精密加工システムの開発(第1報)—基本概念と修正加工例—, 精密工学会誌, 65, 2, pp. 406-410 (1999).
- (12) K. Furutani et al.: Multiple Degrees-of-Freedom Arm with Passive Joints for on-the-Machine Measurement System by Calibrating with Geometrical Solids, Prec. Eng. (in press).
- (13) K. Furutani et al.: A built-in Displacement Sensor for an Impact Drive Mechanism, Meas. Sci. Technol., 10, 6 (1999) (in press).

#### 本研究に関する公表文献

- (1) 古谷克司ほか:パラレルメカニズムを用いた走査放電加

このほかProceedings11編、口頭発表16件