



M. Yang

金型内蔵マイクロマルチセンサーと センサーフュージョンシステムを用いた 新しいプロセス計測技術の開発

楊 明*

1. まえがき

インダストリー4.0に代表される次世代生産技術やIoT技術を利用した生産システムの見える化知能化が求められる中、塑性加工において、サーボプレスなどを利用した高精度かつ省エネな加工プロセスを実現するための技術開発が盛んに行われている。サーボプレス利用技術の高度化に向けて、プロセスシミュレーション・設計技術やセンシング制御技術への要求が高まっている。

塑性加工において多くの場合金型が用いられるため、素材変形や摩擦状態を直接測定することは困難であり、金型内部での状態をモニタリングするための内蔵センサーやセンシング技術の開発が大きな課題となる。今まで素材と金型の接触に伴う金型に生じる物理的な変化の測定や、素材変形に伴う金型表面や内部に生じる応力場やひずみ分布を測定することにより、間接的に素材の変形形態や素材と金型との接触形態の測定に関する研究が行われている¹⁾。金型表面近傍に測圧ピンを埋め込み、加工時における金型表面の応力や摩擦力測定や、複数高感度ひずみゲージによる応力分布の測定やセンサー情報とシミュレーション情報の融合による複雑事象の同定が試みられている²⁾⁻⁸⁾。しかし、金型内で生じる各種複雑な現象を把握することは大変困難であり、限られた情報を基にプロセスの制御が行われているのが現状である。

本論文著者は、半導体加工技術を利用して、複数センサーから構成するマイクロセンサーユニットを開発し、金型内部に内蔵することによって、加工に伴う金型の応力分布を測定し、そのオンライン測定データから加工情報を推定する新しい計測手法を提案し、すでに幾つかの実験により、板材曲げ加工中における金型の応力情報を得ることに成功した⁹⁾⁻¹¹⁾。本研究では、金型内蔵センサーの特性に及ぼす影響因子を明確にし、それを改良するためのセンサー構成及び内蔵方法について検討した。

2. マイクロセンサーの開発と金型への実装

2.1 金型内蔵センサー概要

塑性加工における材料変形状態を直接測定することは困難であるが、金型の変形情報を測定し、金型の変形と被加工材との相関関係から、間接的に被加工材の変形情報を得られることから、半導体シリコンウエハ上に高感度半導

体ゲージを複数配置し、半導体プロセスにより製作した後、数 mm の大きさに切出し、金型に埋め込むことにより、金型内部の複数箇所のひずみを測定することが提案された⁹⁾。半導体ゲージからの信号を無線通信回路による通信を行うことにより、センサー情報をリアルタイムにコントローラに伝送することが可能となる。図1にセンシングシステムの概念を示す。金型にマイクロセンサーユニットを埋め込むことによって、内部の応力及び応力分布などの情報を取り出すというシステムである。金型内部の変形情報を得るのに、多くのセンサーを配置する必要があり、その配線も困難となるため、複数のセンサーをユニットにして、幾つかのユニットを金型に埋め込む形にした。センサーユニットから出たリード線は金型の横に貼り付けてある小型無線通信ユニットに接続され、測った金型内部の情報をこの無線通信ユニットを通じて、処理システムへ転送され、処理される¹⁰⁾。

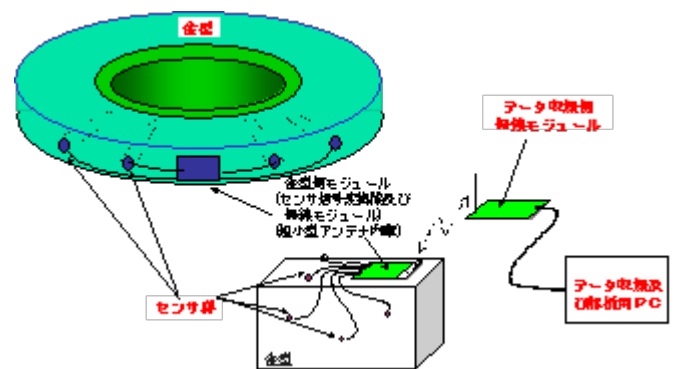
図1 金型内蔵センシングシステムの概念図¹⁰⁾

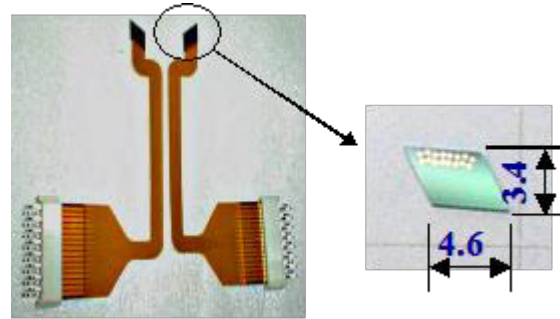
図2に設計したセンサーの一例および主な仕様を示す。シリコンウエハに $0.3\text{mm} \times 0.1\text{mm}$ のひずみゲージを作りこみ、局部的に発生した応力を計測することが出来る。温度の影響を補償するために同じ箇所にマイクロゲージを4つ形成し、それぞれを金属配線で接続し、ホイートストンブリッジを構成し、一つのマイクロ応力センサーを形成した。このようなマイクロセンサーを複数箇所配置することにより、応力分布を直接測定することが可能である。

* 首都大学東京システムデザイン研究科 教授

また、測定対象に合わせてマイクロセンサーの数やその配置パターンなどを適切に設計することができる。それを複数箇所に作りこむことにより、同時に複数の応力を同時に計測することができる。それを金型の適切な箇所に内蔵させることにより、加工時金型が受ける応力をリアルタイムでモニタリングすることができる。図3に製作したマイクロセンサー例の写真を示す。いずれのセンサーも基本単位となるマイクロセンサーは同様なスペックであるが、その配置パターンが異なる。図3(a)では、4つのマイクロセンサーを一直線上に等間隔に配置したものであり、センサー間のピッチは0.5mmである。図3(b)の例では、4つのマイクロセンサーを同心円上に同間隔に配置し、測定する応力軸は半径方向に向くようになっている。直線配置センサーチップは、金型に内蔵して等間隔に応力情報を得ることができ、汎用性が高い。円周配置センサーチップは球面金型に対して、有効に情報を取得することができる。

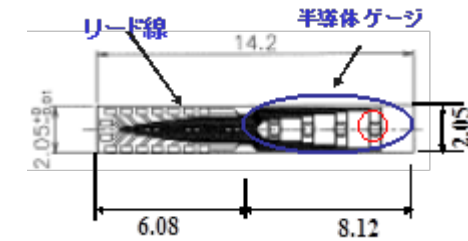


(a) 直線配置型

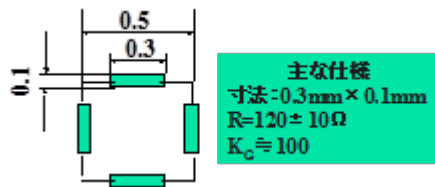


(b)円周配置型

図3 製作したマイクロセンサー例

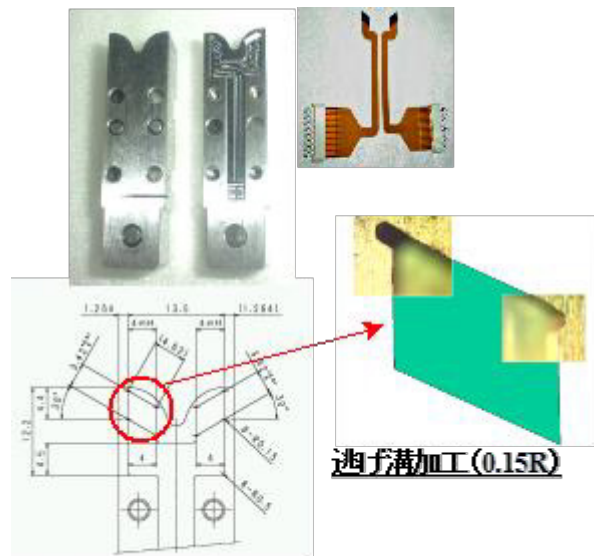


(a) マイクロセンサーチップの概要



(b) センサー部詳細寸法と主な仕様

図2 マイクロセンサーチップの設計例



(a) センサー溝加工



(b) 金型外観

図4 マイクロセンサーの金型への埋め込み

2.2 マイクロセンサーの金型への実装

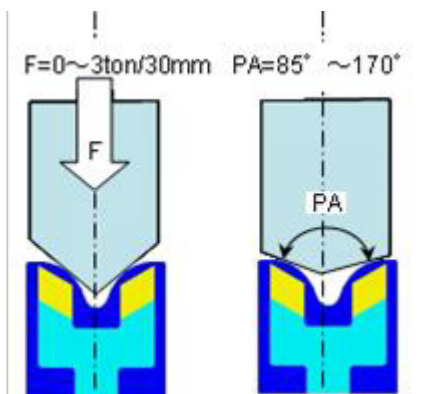
図4にマイクロセンサーの曲げ加工用金型への埋め込みの様子を示す¹¹⁾。まず、図4(a)に金型の概観を示す。金型にあらかじめ、図3(b)に示す円周配置型センサーのマイクロセンサーチップの寸法に合わせて、高精度にマイクロセンサーチップをはめ込む溝を加工する。この場合、センサーエッジと干渉しないように溝の4隅に逃げ穴の加工を施した。センサーチップを金型内にはめ込み、エポキシ系接着剤で接着した。センサーを内蔵した後、もう片方の金型とピン及びボルトで締結しユニットが完成する。最終的に図4(b)に示すような形となる。

2.3 金型内蔵センサーの特性評価

金型内蔵センサーの特性を評価するために、まず、センサー内蔵曲げ金型プレスブレーキ機械設置し、静的荷重の加えることによって、センサーの特性を評価した。図 5(a) にマイクロセンサー内蔵金型をプレスに取り付けた様子を示す。先ず、図 5(b) に示すように先端角度の異なる加圧パンチを製作し、センサー内蔵金型に対して、直接加圧を行った。それぞれの加圧角度における各センサーの出力値について検証を行った。使用した加圧パンチの先端角度は 85° から 170° までの計 10 種類、圧力は 0~30tonf とした¹¹⁾。



(a) プレスブレーキ機に金型設置概観



(b) 静的荷重評価概要

図 5 金型内蔵マイクロセンサーのプレスブレーキ機外観及び静的荷重評価概要

代表的な結果を図 6 に示す。図からわかるように、各センサーの出力特性は比較的良好な直線性を示しており、また角度の変化に伴い、各センサーが異なる出力パターンを示す。その繰返し性もよいであることが分かった。各角度に対するひずみ出力の変化を纏めた結果を図 7 に示す。個々のセンサーの出力ひずみは加圧角度の変化に応じて、増減することが分かった。加工中、素材の変形に伴う接触部分の移動を、4つのセンサー信号の増減パターンより検出可能であることを示唆している。

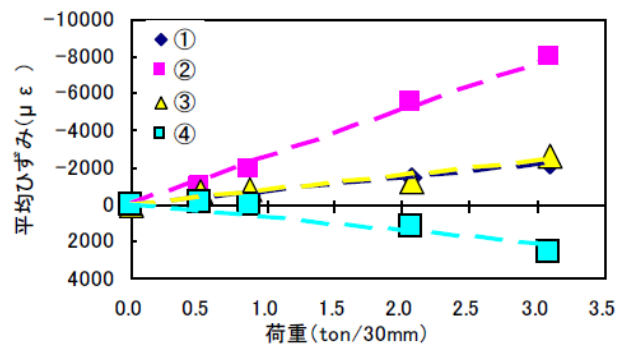


図 6 130 度パンチ静的荷重によるセンサー特性の評価

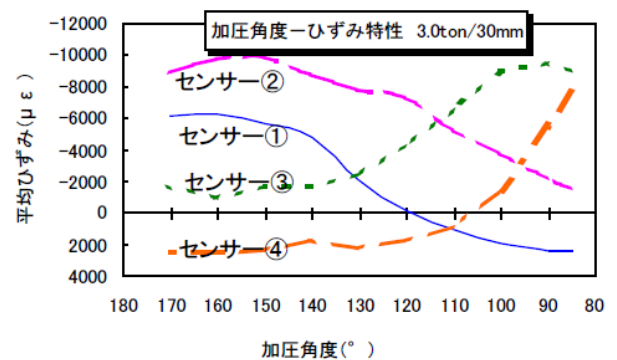


図 7 各センサーひずみ出力と加圧角度との関係

次にプレスブレーキに角度センサーを装着し、実曲げ加工を行い、動的な荷重に対するセンサー特性評価を行った。代表的なデータとして SUS304, t=1.0mm の材料を用いた場合の各センサー出力波形を図 8 に示す。これは両側の金型に内蔵センサーからモニタリングした出力の平均値と挟み込み角度の推移との関係を表したものである。同一材料での繰返し曲げに対して、各センサーからのひずみ波形はほぼ同じであるが、絶対値にばらつきがあることが分かった。ばらつきは約 40%であった。同時に評価を行った軟鋼板材 (SPCC)、アルミ合金も同様な傾向を示した。また、同一材料の繰返し曲げにおける試験片間の物性や板厚のばらつきを評価するために、曲げ荷重の繰返し性を評価した。結果から試験片間のばらつきに起因する荷重の変動は 0.1tonf 程度であり、約 8%であった¹²⁾。

今回試作したマイクロセンサーシステムは高感度であり、金型が受ける微小な応力の測定に適していることが分かった。しかし、金型に内蔵した場合、測定データにばらつきが大きく、繰返し性に問題が残された。これは、マイクロセンサー、金型内溝の形状精度、さらにセンサーの金型内への埋め込み時のセンサーと金型溝間の接着特性などの各種要素技術にまだ課題が残されており、今後、これらの課題をクリアしていく必要がある。

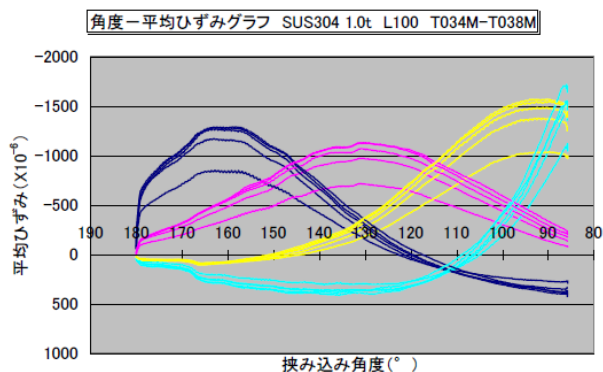


図 8 曲げ加工における各センサーのひずみ出力と挟み込み角度との関係

3. マイクロセンサーの金型への実装課題と改良

3.1 金型実装の技術課題

今回提案した半導体材料を使った高感度なマイクロセンサーを金型に内蔵して使用する際、下記のような問題点が考えられる。

マイクロセンサー加工

半導体材料のシリコンウエハ表面にゲージの作成は比較的標準プロセスによって行うことが可能であり、リード線を引き出すためのフレキシブルなケーブルへの接合も比較的高精度に実現できる。しかし、ダイシングソーを用いてセンサーチップをウエハから切り出したため、4隅に鋭利なエッジが残り、面取りも出来ていないため、金型へ内蔵する際、金型の溝加工がそれに合わせる事が容易ではなかった。今回、溝加工時、4隅に逃げ穴を加工し、センサーと溝との干渉を回避したが、逃げ穴の影響が無視できないことが分かったので、今後、センサー形状の設計、及びセンサーブロックの切り出し方法について検討する必要がある。

金型内溝加工

今回の金型の溝はマイクロ放電加工によって製作された。大よその寸法精度が得られたが、表面粗さ、及び側面の垂直度、側面底辺の R を残したことで、溝の4隅に逃げ穴を施したことがセンサーとの形状不一致が生じた原因と考えられる。より精密な仕上げ加工を追加することが必要である。また、側面底辺の R が極力ゼロになるような加工法、溝の4隅に逃げ穴を設けないように形状設計を行う必要がある。

センサーと金型内への埋め込み

センサーを金型内に埋め込む際、センサーと金型との界面にエポキシ系の接着剤を流し込んで、接着を行った。し

かし、界面の隙間が数 μm 程度の場合、接着剤の流動抵抗が高く、また、界面に存在する気泡を完全に追い出すことが困難であり、側面全面に行き渡らない可能性がある。その結果、素材変形時の応力が金型表層部からセンサーに精度よく伝わらなかった可能性がある。接着剤の充填を容易にするため、クリアランスを大きめに設定し、接着剤を確実にシリコン基板周りに行き渡らせて上記のような部分的な接触、空洞等の不安定要素が発生しないように再試作を試みた。この場合、接着層が厚くなると感度の低下は見受けられるが、ひずみ波形にはほとんど変化が見られなかったため、接着工程の見直しが必要となる。

3.2 金型実装技術の改良

以上のことを踏まえて、センサーを金型内へ実装技術として、以下のような改造が有効であると考えられる。

- ・接着層を廃止しセンサーチップに上下からプリロードを掛けてクリアランスゼロを実現する。
- ・センサーチップと金型母材との接触状態を改善するため、放電加工で製作されたセンサー溝加工面を平滑化する。例えば、電子ビームの照射による表面粗さの低減を行う。
- ・センサー内蔵溝の加工精度を向上させるために3ピースに分割し、センサー収納部分の加工を通し加工でできるようにする。
- ・シリコンセンサーチップと金型はいずれも硬い材質であり、両方の面精度を極限まで高めることが困難である。力の伝達を高効率にできるように、センサーチップと金型の界面に中間層をメッキなどで形成する。

上述の改造方法について総合的にセンサー及び内蔵溝形状設計、加工精度の向上によって、初めて高感度なセンシングシステムが実現できると思われる。今後、個々の要素技術を確認し、それぞれの効果を定量的に分析評価し、金型内蔵センサー実装精度向上への寄与度を評価する予定である。

3.3 新しい金型内蔵センサーの提案

金型内蔵センサーの場合、センサーと金型との接合が大きな課題となり、センサーの形状精度、金型内蔵形状、接合方法などを精密に制御する必要がある。一方、金型表面に直接センサーを創製することができれば、接合を要しない簡易な方法による金型内蔵センサーシステムの創製を得ることができる。

そこで、金型表面へのマイクロセンサーの創成を試みた。金属金型の表面に微細な溝を形成し、3次元フォトリソグラフィ技術を用いて、溝側面に直接マイクロセンサーのパターンを形成した。

図9にマイクロセンサー形成プロセスの流れを示す。金型表面に幅がサブミリ程度のV溝を機械加工で形成する。V溝表面に絶縁層としてポリイミドをコーティングし、さらにその上に抵抗体薄膜を電着でコーティングする。抵抗

体薄膜表面にフォトレジストを薄く塗布し、3次元フォトリソグラフィによってフォトレジストのパターニングを行い、エッチングによって、抵抗体薄膜の不要な部分を除去したあと、保護膜として表面に再度ポリイミドを塗布する。このようなプロセスによって形成される抵抗体ゲージが金型表面の必要な場所に配置することができる。また、表層部に限りなく近く、高感度で金型表面の応力を測定することが可能である。ポリイミドに負われる僅かな溝が金型表面に残るが、ポリイミドと金型との接着強度が高く、加工による剥離が起こることもなく、加工プロセスへの影響も殆ど無視できる。

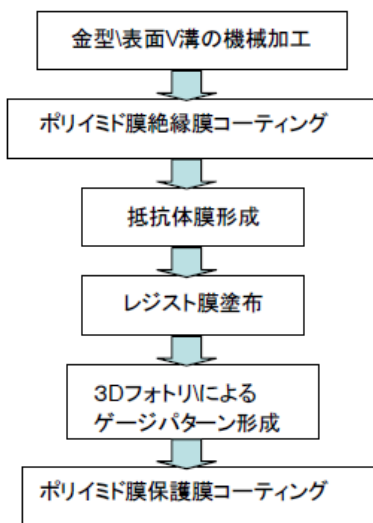
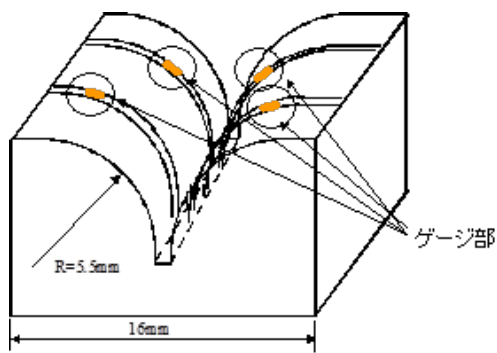
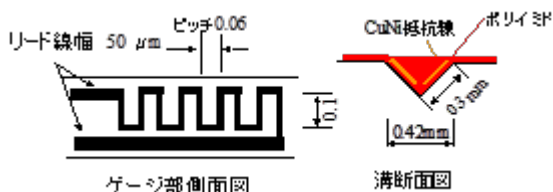


図9 3Dフォトリソグラフィによる金型表面ゲージ形成の流れ



(a) 抵抗体ゲージを形成した曲げ金型



(b) ゲージ部詳細

図10 V曲げ金型表面へのゲージ形成概要

この技術を利用したV曲げ金型表面へのゲージ製作を試みた。図10に曲げ用金型とその表面へのゲージパターン作成の概要を示す。金型表面に曲げ方向に沿って、幅0.4mm、深さ0.2mm程度のV溝を機械加工で製作した。V溝の両側面に抵抗体ゲージを形成した。曲げ加工プロセスの応力分布を測定するために複数箇所にゲージを配置した。その概要を図10(a)に示す。配置したゲージのパターン寸法等を図10(b)に示す。また、形成されたセンサー部の拡大イメージを図11に示す。今後、金型表面層に削られたセンサーの評価試験を実施し、センサー感度、再現性、耐久性などについて評価していく。

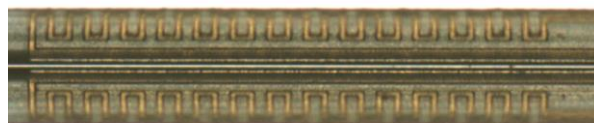


図11 3DフォトリソグラフィによるガラスV溝へのゲージパターン形成

4. まとめ

本研究では、半導体加工技術を利用して複数半導体ゲージから構成されるマイクロセンサーを製作し、それを金型の適切な箇所に内蔵させ、加工中の金型の微小変形とその分布を測定することにより、塑性の変形形態や素材変形に伴う複雑な事象を計測する新しいセンシングシステムを提案した。具体的には板材曲げ加工を例に挙げ、マイクロセンサーの設計、開発を行い、曲げ加工中の材料変形抵抗や曲げ角度の測定を行うことにより、金型内蔵センサーの各種課題を明確にした。

シリコンウエハ上に数百ミクロンサイズの抵抗線を複数パターンニングし、半導体プロセスにより半導体ゲージを実際に製作した。完成した数mmサイズのセンサーチップを金型に埋め込み、曲げ加工時の応力分布を直接測定することができたが、金型へのセンサーチップの実装技術には、またいくつかの課題が残されており、実用化に向けて、センサー形状及びセンサー内蔵のための金型加工の高精度化が必要である。

また、3次元フォトリソグラフィ技術を利用して、マイクロゲージパターンを直接金型表面へ創製することにより、実装を必要としない金型表面センサー創製技術を開発し、今後の実用化が期待される。

謝辞

本研究は天田金属加工機械技術振興財団（現 公益財団法人天田財団）一般研究開発助成（平成19年度）の支援を受けて行われたものであり、同財団に深甚の謝意を表す。

参考文献

- 1) 楊 明：塑性と加工，41-474，(2000)653.
- 2) 高橋 壯治：塑性と加工，8-83，(1987)698.
- 3) 米山猛，畑村洋太郎，北側正義，榊原孝二：塑性と加工，35-397，(1994)158.
- 4) J. Jewiet, C. Nyahumwa: J. of Materials Processing Technology, 39, (1993)251.
- 5) 児島 之夫，森川 裕彦，水野 高爾：塑性と加工，25-295，(1985)855.
- 6) 木原 諄二・牧野 浩明・申 光憲：塑性と加工，25-284，(1984)806.
- 7) 地原 辰也・木原 諄二・相澤 龍彦：41 回塑加連講論，(1990)199.
- 8) 地原 辰也・木原 諄二・相澤 龍彦：平 3 塑加春講論，(1991)，379.
- 9) M. Yang, J. Koyama: Proc. of the 8th ESAFORM Conference on Material Forming, (2005) 289.
- 10) 任均謀，楊明，小山純一，笹倉豊喜：第 54 回 塑性加工連合講演会講演論文集，(2003)247.
- 11) 影山雄介，小山純一，楊明，今井一成：第 55 回塑性加工連合講演会講演論文集，(2004)23.
- 12) 小山純一，楊明：塑性と加工，51-596，(2010)904.